



TUGAS AKHIR – EE 184801

PENALAAAN KONTROLER PID DAN *BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS* (BESS) UNTUK *LOAD FREQUENCY CONTROL* (LFC) MENGGUNAKAN *BAT ALGORITHM* (BA)

Abdil Jabbar Asyadili
NRP 07111240000071

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, M.T.
Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT – EE 184801

**TUNNING OF PID CONTROLLER AND BATTERY
ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) FOR LOAD
FREQUENCY CONTROL (LFC) USING BAT
ALGORITHM (BA)**

Abdil Jabbar Asyadili
NRP 07111240000071

Supervisor
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, M.T.
Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

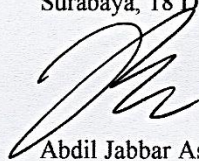
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “Penalaan Kontroler PID dan *Battery Energy Storage Systems* (BESS) untuk *Load Frequency Control* (LFC) menggunakan *Bat Algorithm* (BA)” adalah benar-benar hasil karya intelektual sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya orang lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Surabaya, 18 Desember 2018



Abdil Jabbar Asyadili
NRP.0711124000071

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENALAN KONTROLER PID DAN BATTERY ENERGY
STORAGE SYSTEMS (BESS) UNTUK LOAD FREQUENCY
CONTROL (LFC) MENGGUNAKAN BAT ALGORITHM (BA)**

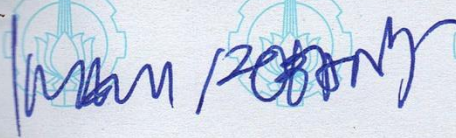
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, M.T.
NIP. 196308171990031001

Dosen Pembimbing II



17/1/19

Dr. Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc.
NIP. 198208292006042001



Halaman ini sengaja dikosongkan

PENALAAAN KONTROLER PID DAN BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS (BESS) UNTUK LOAD FREQUENCY CONTROL (LFC) MENGGUNAKAN BAT ALGORITHM (BA)

ABSTRAK

Dalam sistem tenaga listrik osilasi frekuensi dapat menyebabkan generator lepas sinkron. Peredaman osilasi frekuensi harus dapat diredam dengan baik agar kemungkinan terjadinya lepas sinkron pada generator dapat dicegah. Konsep pengaturan frekuensi pada sistem tenaga disebut *Load Frequency Control* (LFC). Konsep LFC adalah mengatur governor agar dapat menyeimbangkan kecepatan turbin dengan perubahan beban yang ada. Pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai analisa respon deviasi frekuensi dan daya sistem akibat adanya gangguan berupa perubahan daya beban.

Kontroler PID dapat digunakan sebagai kontroler tambahan dalam pengaturan governor agar performansi sistem dapat meningkat. Performansi frekuensi pada sistem tenaga dapat ditingkatkan dengan menggunakan peralatan penyimpan energi listrik *Battery Energy Storage System* (BESS). Parameter pada PID dan BESS dioptimisasi dengan *Bat Algorithm* (BA) untuk mendapat koordinasi yang baik dari keduanya.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa respon deviasi frekuensi dari sistem dengan tambahan koordinasi kontroler PID dan BESS memiliki nilai *overshoot* yang lebih kecil dan *settling time* yang lebih cepat dari pada sistem yang tidak menggunakan penambahan apapun, maupun terhadap sistem dengan kontroler PID dan BESS yang bekerja sendiri-sendiri. Lalu penalaan menggunakan BA pada parameter kontroler PID dan BESS menghasilkan hasil yang lebih baik daripada penalaan parameter dengan tidak menggunakan BA.

Kata kunci: *Load Frequency Control*, kontroler PID, BESS, dan *Bat Algorithm*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

TUNING OF PID CONTROLLER AND BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS (BESS) FOR LOAD FREQUENCY CONTROL (LFC) USING BA ALGORITHM (BA)

ABSTRACT

In a power system the frequency oscillation can cause the generator to lose sync. Reduction of frequency oscillation must be well muted so that the possibility of lose sync in the generator can be prevented. The concept of frequency control in a power system is called Load Frequency Control (LFC). The LFC concept is to set the governor to be able to balance the speed of the turbine with changes in the existing load. In this final project, we will discuss the analysis of the frequency deviation response and system power due to a disturbance in the form of load power changes.

The PID controller can be used as an additional controller in the governor's settings so that system performance can increase. Frequency performance on the power system can be increased by using the electric energy storage device Battery Energy Storage System (BESS). The parameters in PID and BESS are optimized with Bat Algorithm (BA) to get good coordination from both.

The simulation results show that the frequency deviation response from the system in addition to the coordination of the PID controller and BESS has a smaller overshoot value and faster settling time than the system that does not use any additions, nor to systems with PID controllers and BESS that work individually. Then tuning using BA to PID and BESS controller parameters produces better results than tuning parameters by not using BA.

Keywords: Load Frequency Control, PID controller, BESS, and Bat Algorithm.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, syukur yang tiada henti penulis panjatkan kehadiran Allah SWT serta tidak lupa shalawat serta salam semoga tetap tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW sehingga penelitian dalam tugas akhir ini bisa selesai insyaAllah dengan baik.

Pada kesempatan yang sangat berbahagia ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Keluarga khususnya orang tua yang senantiasa memberikan doa, nasihat, motivasi, dukungan dan karena keberadaan merekalah penulis tetap semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. dan Ibu Dr. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang sangat luar biasa yang telah banyak memberi bimbingan, inspirasi, pengarahan, dan motivasi yang diberikan selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Djoko Purwanto M.Eng. dan Bapak Dr. Dimas Anton Asfani ST., MT. selaku dosen wali yang tidak pernah bosan memberikan nasehat dan motivasi kepada saya.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku ketua Departemen Teknik Elektro ITS, serta Bapak Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph.D. selaku koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.
5. Seluruh dosen pengajar dan staff Departemen Teknik Elektro ITS yang melengkapi kualitas pelayanan menjadi sangat baik.
6. Rekan-rekan mahasiswa e-52 yang memberikan kesan mendalam, semangat, dan keakraban selama masa studi kuliah.
7. Rekan-rekan penghuni dan sesepuh Lab PSOC yang banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis sadar bahwa Tugas Akhir ini masih belum sempurna dan masih banyak hal yang perlu diperbaiki. Saran, kritik dan masukan baik dari semua pihak sangat membantu penulis terutama untuk berbagai kemungkinan pengembangan lebih lanjut.

Surabaya, 10 Januari 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Metode Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA	
2.1 Dinamika dan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.1.1 Kestabilan <i>Steady-state</i>	5
2.1.2 Kestabilan <i>Transient</i>	6
2.1.3 Kestabilan <i>Dynamic</i>	6
2.2 Pemodelan LFC pada Sistem Tenaga Listrik	6
2.2.1 Torsi Mekanik dan Elektrik	7
2.2.2 Frekuensi dan Daya Aktif.....	8
2.2.3 Persamaan <i>Swing</i>	9
2.2.4 Pemodelan Generator	12
2.2.5 Pemodelan Beban.....	12
2.2.6 Pemodelan Turbin	13
2.2.7 Pemodelan Governor.....	14
2.2.8 Pemodelan LFC pada Sistem Tenaga Listrik <i>Single Area</i>	17
2.2.9 Pemodelan LFC pada Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi Dua Area	17
2.3 Kontroler Proportional Integral Differential.....	22
2.3.1 Kontroler Proporsional	22
2.3.2 Kontroler Integral.....	23
2.3.3 Kontroler Diferensial.....	25
2.3.4 Kontroler Proporsional, Integral, dan Diferensial.....	27

2.4 Battery Energy Storage System.....	27
2.4.1 Karakteristik BESS	29
2.4.2 Konverter 3 phasa 12-pulsa.....	31
2.4.3 Pemodelan BESS	32
2.5 Bat Algorithm.....	37
BAB 3 PENALAN KONTROLER PID DAN BESS	
MENGUNAKAN BA	
3.1 Algoritma	41
3.2 Data Sistem Tenaga Listrik Single dan Dua Area	42
3.3 Penambahan Kontroler PID	44
3.5 Penerapan BESS	46
3.6 Penambahan Kontroler PID dan BESS.....	48
3.7 Penalaan PID dan BESS menggunakan BA.....	50
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	
4.1 Respon Δf Sistem <i>Single Area</i>	55
4.1.1 Respon Δf sistem <i>single area</i> dengan $\Delta P_L=0.02$ pu.....	55
4.1.3 Respon Δf sistem <i>single area</i> dengan $\Delta P_L=0.05$ pu.....	57
4.2 Respon Sistem Dua Area	58
4.2.1 Respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0.02$ pu.....	59
4.2.3 Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0.05 pu	64
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	69
5.1 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
NOMENKLATUR.....	71
RIWAYAT HIDUP PENULIS	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Skematik LFC [5]	7
Gambar 2.2	Generator dan beban [1]	8
Gambar 2.3	Diagram Blok Generator.....	12
Gambar 2.4	Diagram blok efek load damping	13
Gambar 2.5	Diagram blok efek load damping yang sederhana	13
Gambar 2.6	Diagram Blok Turbin	14
Gambar 2.7	<i>Governor Watt</i>	14
Gambar 2.8	Karakteristik Kecepatan Governor.....	15
Gambar 2.9	Diagram Blok Governor	16
Gambar 2.10	Diagram Blok LFC Sistem <i>Single Area</i>	17
Gambar 2.11	Sistem Interkoneksi Dua Area	17
Gambar 2.12	Electrical Equivalent Sistem Interkoneksi Dua Area ...	18
Gambar 2.13	Model linier sistem tenaga listrik dua area	19
Gambar 2.14	Pengaruh perubahan beban pada area 1 dan area 2	21
Gambar 2.15	Diagram blok kontroler proporsional	23
Gambar 2.16	Kurva sinyal kesalahan $e(t)$ terhadap t dan kurva $u(t)$ terhadap t pada pembangkit kesalahan nol	24
Gambar 2.17	Diagram Blok hubungan antara besaran kesalahan dengan kontroler integral.....	24
Gambar 2.18	Perubahan keluaran sebagai akibat penguatan dan kesalahan.....	25
Gambar 2.19	Diagram blok kontroler diferensial	26
Gambar 2.20	Diagram blok kontroler PID	27
Gambar 2.21	Deskripsi schematic dari BESS.....	28
Gambar 2.22	Estimasi kapasitas total baterai di seluruh dunia yang telah terpasang pada aplikasi sistem tenaga.....	30
Gambar 2.23	Rangkaian penyearah 12 pulsa.....	31
Gambar 2.24	Rangkaian ekuivalen dari BESS	33
Gambar 2.25	Diagram blok BESS yang telah dilinearisasi	36
Gambar 3.1	Flowchart penyelesaian Tugas Akhir	41
Gambar 3.2	LFC sistem <i>single area</i> Hadi Saadat.....	42
Gambar 3.3	LFC sistem dua area Hadi Saadat	43
Gambar 3.4	Sistem LFC <i>single area</i> dengan kontroler PID	45
Gambar 3.5	Sistem LFC dua area dengan kontroler PID	45
Gambar 3.6	Sistem LFC <i>single area</i> dengan BESS.....	46
Gambar 3.7	Sistem LFC dua area dengan BESS	47

Gambar 3.8	Blok diagram BESS	48
Gambar 3.9	Sistem LFC <i>single</i> area dengan kontroler PID dan BESS	49
Gambar 3.10	Sistem LFC dua area dengan kontroler PID dan BESS	50
Gambar 3.11	Grafik konvergensi ba pada optimasi parameter sistem <i>single</i> area	52
Gambar 3.12	Grafik konvergensi ba pada optimasi parameter sistem dua area.....	53
Gambar 4.1	Respon sistem <i>single</i> area terhadap perubahan beban 0,02 pu.....	56
Gambar 4.2	Respon sistem <i>single</i> area terhadap $\Delta P_L=0,05$ pu	57
Gambar 4.3	Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,02 pu pada area 1	59
Gambar 4.4	Respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0,02$ pu pada area 2	61
Gambar 4.5	Respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0,02$ pu pada <i>tie line</i>	62
Gambar 4.6	Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 1	64
Gambar 4.7	Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 2	66
Gambar 4.8	Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada <i>tie line</i>	67

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter sistem <i>single</i> area Hadi Saadat.....	43
Tabel 3.2	Parameter sistem dua area Hadi Saadat	44
Tabel 3.3	Parameter kontroler PID pada kedua area.....	44
Tabel 3.4	Data parameter BESS	47
Tabel 3.5	Parameter PID dan BESS pada kedua area	49
Tabel 3.6	Data parameter BA	51
Tabel 3.7	Hasil optimasi parameter PID dan BESS menggunakan BA pada <i>single</i> area	52
Tabel 3.8	Hasil optimasi parameter PID dan BESS menggunakan BA pada dua area.....	52
Tabel 4.1	Data respon sistem <i>single</i> area terhadap perubahan beban 0,02 pu.....	56
Tabel 4.2	Perbandingan nilai <i>overshoot</i> pada masing-masing skenario	57
Tabel 4.3	Data respon sistem <i>single</i> area terhadap $\Delta P_L=0,05$ pu	58
Tabel 4.4	Perbandingan nilai <i>overshoot</i> pada masing-masing skenario	58
Tabel 4.5	Data respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,02 pu pada area 1	60
Tabel 4.6	Perbandingan nilai <i>overshoot</i> pada masing-masing skenario	60
Tabel 4.7	Data respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0,02$ pu pada area 2	61
Tabel 4.8	Perbandingan nilai <i>overshoot</i> pada masing-masing skenario	62
Tabel 4.9	Data respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0,02$ pu pada <i>tie line</i>	63
Tabel 4.10	Perbandingan nilai <i>overshoot</i> pada masing-masing skenario	63
Tabel 4.11	Data respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 1	64
Tabel 4.12	Perbandingan nilai <i>overshoot</i> pada masing-masing skenario	65
Tabel 4.13	Data respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 2	66
Tabel 4.14	Perbandingan nilai <i>overshoot</i> pada masing-masing skenario	67

Tabel 4.15	Data respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 2.....	68
Tabel 4.16	Perbandingan nilai <i>overshoot</i> pada masing-masing skenario.....	68

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan pasokan energi listrik akan naik seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk yang disertai dengan kemajuan teknologi. Apabila demikian, maka pembangkit harus menyuplai daya listrik dengan jumlah yang besar. Suplai daya listrik yang diberikan oleh pembangkit ini diatur oleh governor. Governorlah yang mengatur katup uap dan bahan bakar sehingga mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan oleh pembangkit.

Namun bukan hanya dalam segi kuantitas, dalam segi kualitas listrik harus dijaga dengan baik. Dimana sifat beban merupakan tergolong dinamis maka kestabilan adalah parameter penting dalam menentukan kualitas sistem tenaga listrik. Dalam proses suplai energi yang dilakukan, daya aktif dan daya reaktif perlu dipertahankan keseimbangannya, baik dari sisi tegangan maupun frekuensi.

Perubahan beban yang tidak dapat diprediksi menyebabkan timbulnya osilasi frekuensi pada generator. Osilasi pada generator dapat menyebabkan pengurangan kekuatan transfer daya hingga menyebabkan generator lepas sinkron. Maka dari itu diperlukan kontroler yang dapat mengontrol governor agar bekerja secara cepat dan stabil.

LFC merupakan salah satu kontroler fluktuasi frekuensi akibat perubahan beban, dimana dalam penggunaannya dapat dilakukan dengan pengontrolan integral gain pada governor [1]. Kontroler PID bisa digunakan pada LFC untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Namun, dalam kondisi beban yang berubah-ubah dan tidak pasti, Kontroler PID tidak cukup untuk menanggulangi perubahan beban tersebut. Ini terjadi karena Kontroler PID digunakan untuk mengontrol governor, dimana response governor cukup lambat sedangkan perubahan beban listrik sangat cepat. Oleh sebab itu alat tambahan seperti BESS dapat menjadi solusi untuk menanggulangi perubahan beban yang cepat. Dengan menggunakan kontroler PID dan BESS maka performansi frekuensi pada sistem tenaga menjadi lebih baik [2].

Penambahan artificial intelligent (AI) sebagai optimisasi parameter PID dan BESS merupakan konten yang ditambahkan penulis dengan harapan mendapatkan hasil yang lebih optimal lagi. Adapun AI yang akan digunakan adalah bat algorithm (BA).

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memodelkan kontroler PID dan BESS yang optimal untuk LFC?
2. Bagaimana menentukan koordinasi parameter PID dan BESS yang optimal dengan menggunakan BA?
3. Bagaimana performansi sistem setelah dipasang kontroler yang diusulkan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan sistem mengacu pada buku Hadi Saadat.
2. Hanya berfokus pada studi load frequency control.
3. Beban pada sistem merupakan beban statis, dengan gangguan bersifat dinamis.
4. Gangguan yang dianalisa merupakan osilasi frekuensi.
5. Faktor ekonomi dan harmonisa diabaikan.
6. Menggunakan Artificial Intelligent Bat Algorithm simulasi menggunakan Matlab R2017a.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat simulasi kontroler PID dan BESS untuk LFC.
2. Menentukan penalaan kontroler PID dan BESS dengan menggunakan algoritma BA.
3. Mengamati dan memahami performansi sistem dengan membandingkan respon frekuensi dan daya pada pemodelan single dan antar area:
 - sistem tanpa kontroler
 - sistem dengan kontroler PID saja
 - sistem dengan BESS saja
 - sistem dengan PID dan BESS
 - dan sistem dengan PID dan BESS yang dioptimisasi oleh BA

1.5 Metode Penelitian

Pada Tugas Akhir ini, dilakukan optimisasi pada parameter kontroler PID dan BESS yang dipasang pada sistem tenaga listrik baik *single* maupun dua area. Optimisasi ini dilakukan menggunakan BA. Data parameter yang diperlukan dalam Tugas Akhir ini meliputi pemodelan dan parameter sistem. Sistem tenaga listrik *single* dan dua area, kontroler PID, serta BESS disimulasikan dalam Simulink, sedangkan program dari BA disimulasikan dalam program M-File. Tahapan yang pertama dalam melakukan tugas akhir ini adalah memodelkan sistem tenaga listrik *single* dan dua area pada simulink dengan parameter yang sudah didapatkan dari literatur. Performansi kestabilan sistem diuji terlebih dahulu, setelah sistem stabil, baru dilakukan pemodelan kontroler PID dan BESS. Parameter PID dan BESS ditentukan dengan metode *trial error* dengan menimbang hasil penelitian-penelitian sebelumnya. Setelah itu parameter PID dan BESS yang sudah dipasang dioptimisasi menggunakan BA. *Comprehensive damping index* (CDI) digunakan sebagai fungsi objektif pada BA agar sistem memiliki respon *overshoot* yang rendah dan sistem kembali kekeadaan semula (*settling time*) dalam waktu yang singkat. Simulasi dilakukan beberapa kali untuk mendapatkan hasil yang optimal. Hasil yang didapatkan adalah respon frekuensi dari tiap-tiap area serta daya antar area untuk simulasi terhadap sistem dua area. Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi sistem yang menggunakan metode konvensional dan hasil simulasi sistem yang parameternya dioptimisasi menggunakan BA. Kesimpulan diberikan dalam bentuk hasil analisis dari perbandingan data-data yang diperoleh.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut:

- Bab 1: Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan penelitian, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari Tugas Akhir.
- Bab 2: Dasar teori yang merupakan penjelasan teori mengenai dinamika dan kestabilan sistem tenaga, pemodelan LFC sistem *single* dan dua area, PID, BESS, serta *Bat Algorithm*.

- Bab 3: Penjelasan teori mengenai penerapan kontroler PID, BESS, serta metode optimalisasi *Bat Algorithm* pada sistem *single* dan dua area.
- Bab 4: Hasil simulasi kontroler pada sistem *single* dan dua area baik dengan perlakuan *uncontrol*, penambahan kontrol PID, penambahan BESS, penambahan kontrol PID dan BESS, maupun penggunaan BA dalam optimalisasi penambahan PID dan BESS, serta analisis respon frekuensi pada tiap-tiap arean dan daya antar area.
- Bab 5: Kesimpulan Tugas Akhir yang merupakan kesimpulan dari hasil pembahasan dan mengemukakan saran-saran sehubungan dengan pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut,

1. Meningkatkan kontribusi terhadap perkembangan sistem kelistrikan, khususnya pada permasalahan yang berkaitan dengan BESS.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa sistem tenaga di bidang optimisasi dan pengaturan frekuensi generator.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk tugas akhirnya.

BAB 2

PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA

2.1 Dinamika dan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Dinamika sistem tenaga menjadi faktor penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik. Hal ini dipengaruhi oleh komponen dinamika sistem tenaga listrik seperti generator, jaringan transmisi, beban dan peralatan kontrol. Sifat-sifat dinamik dari sistem tenaga adalah sangat kompleks dan harus dipahami untuk perencanaan sistem operasi yang baik dan aman.

Penyebab utama terjadi dinamika sistem tenaga adalah perubahan beban saat sistem interkoneksi mengalami beban puncak. Hal ini dapat menyebabkan osilasi pada tiap-tiap mesin yang terhubung pada sistem. Osilasi dari masing-masing mesin dapat saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga mesin-mesin dalam satu unit pembangkit beraksi bersama-sama secara serempak untuk menanggulangi pengaruh osilasi dari unit pembangkit yang lain sehingga sistem selalu dalam keadaan stabil.

Stabilitas sistem tenaga listrik telah menjadi perhatian utama dalam sebuah sistem operasi. Perhatian ini muncul dari fakta-fakta bahwa pada kondisi mantap (*steady-state*), kecepatan rata-rata untuk semua generator harus sama. Kondisi tersebut dinamakan pada operasi sinkron dari sebuah sistem yang terinterkoneksi [3].

Kestabilan sistem tenaga listrik diartikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik atau bagian komponen untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Berdasarkan sifat dan besar gangguan, kestabilan dalam sistem tenaga listrik dibedakan menjadi [4]:

1. Kestabilan mantap (*steady-state*)
2. Kestabilan transien
3. Kestabilan dinamik

2.1.1 Kestabilan *Steady-state*

Kestabilan *steady-state* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mencapai kondisi stabil operasi baru yang sama atau identic dengan kondisi sebelum terjadi gangguan. Pendekatan model linier digunakan untuk menganalisis kestabilan *steady-state*. Kestabilan *steady-state* pada system tenaga listrik disebut kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*) [3].

2.1.2 Kestabilan *Transient*

Kestabilan *transient* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi daya setelah terjadi gangguan besar dan mendadak. Contohnya seperti gangguan putus jaring dan pelepasan beban. Pendekatan model nonlinier digunakan untuk menganalisis kestabilan *transient*. Jika pada sistem terjadi gangguan, respon output mencapai kondisi operasi mantap yang diijinkan dan sistem kembali ke posisi semula, maka sistem tersebut dapat dikatakan stabil secara *transient* [3].

2.1.3 Kestabilan *Dynamic*

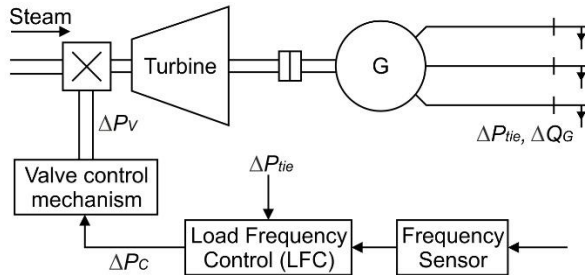
Kestabilan *dynamic* merupakan kestabilan sistem tenaga listrik akibat perubahan beban yang sangat kecil. Perbedaan dari stabilan *dynamic* dengan *steady-state* adalah dalam hal pembuatan pemodelan mesin-mesin dalam sistem tenaga listrik. Pada kestabilan *dynamic*, sistem generator, eksitasi, dan turbin dimodelkan dengan menyediakan fluks yang bervariasi pada air gap mesin. Sedangkan pada kestabilan *steady-state*, model generator yang sederhana digunakan untuk dipresentasikan sebagai sumber tegangan konstan dan tidak terjadi variasi fluks [4].

2.2 Pemodelan LFC pada Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik multi area memiliki pembangkit dengan kapasitas besar dan kecil yang saling terhubung (interkoneksi) satu sama lain. Semua mesin bekerja secara sinkron sehingga frekuensi generator harus sama dengan mesin-mesin tersebut [5]. Kondisi frekuensi pada sistem tenaga listrik bergantung pada keseimbangan daya sistem. Kualitas frekuensi merupakan factor utama dari sistem menyeluruh. Perubahan kebutuhan daya aktif pada satu titik operasi menyebabkan perubahan frekuensi sistem terjadi. Osilasi frekuensi pada sistem tenaga listrik multi area dapat menyebabkan generator lepas sinkron. Semua unit pembangkit yang memiliki governor dapat memberi kontribusi terhadap perubahan pembangkitan, tanpa tergantung lokasi di mana perubahan beban terjadi.

Pengubahan daya output dari generator harus dilakukan secara otomatis untuk mengikuti perubahan beban dinamik. Perubahan beban akan mengakibatkan perubahan daya pembangkit, yang kemudian dapat mengakibatkan perubahan frekuensi sistem. Perubahan frekuensi membutuhkan pengaturan yang tepat. Load Frequency Control (LFC) berfungsi sebagai pengatur frekuensi agar berada pada kisaran yang

diinginkan dan untuk mengatur pertukaran daya antar-area melalui pengaturan daya output dari generator. Fungsi keduanya adalah untuk mengatur pembagian beban saat terjadi perubahan beban yang diperlukan, terutama kepada pembangkit-pembangkit yang beroperasi dengan biaya pembangkit yang murah. Oleh karena itu LFC digunakan sebagai solusi untuk mengatur frekuensi dan beban [1]. Gambar 2.1 menunjukkan *schematic diagram* dari LFC dari generator sinkron,



Gambar 2.1 Diagram Skematik LFC [5]

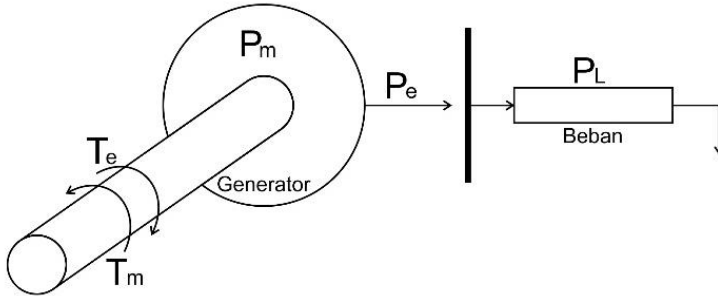
Pada Gambar 2.1 dapat diperhatikan bahwa frekuensi output generator akan dideteksi oleh sensor frekuensi, kemudian sinyal masuk pada blok LFC. Blok LFC juga menerima sinyal aliran daya antar area (P_{tie}) yang kemudian diatur untuk memberikan respon *value* yang mengatur penggerak utama. Δ

Keterangan,

- ΔP_v = Respon katup yang mempengaruhi penggerak utama sehingga memberikan nilai perubahan besar *output* daya
- ΔP_{tie} = Sinyal aliran daya antar area
- ΔP_e = Respon LFC memberikan *feedback* kepada katup
- ΔP_G = Besar deviasi perubahan daya aktif beban
- ΔQ_G = Besar deviasi perubahan daya reaktif beban

2.2.1 Torsi Mekanik dan Elektrik

Konsep dasar pengaturan kecepatan yang diilustrasikan dengan sebuah unit pembangkit yang terisolasi yang menyuplai beban lokal ditunjukkan pada gambar 9.1. Dengan T_e adalah torsi elektrik, T_m adalah torsi mekanik, P_m adalah daya mekanik, P_e adalah daya elektrik, dan P_L adalah daya beban.



Gambar 2.2 Generator dan beban [1]

Pada Gambar 2.2 ditunjukkan proses Tarik-menarik dari torsi mekanik dan torsi elektrik. Keseimbangan antara T_m dan T_e merupakan parameter yang harus dijaga agar tetap seimbang dalam pengaturan frekuensi pada sistem tenaga listrik.

2.2.2 Frekuensi dan Daya Aktif

Pengaturan frekuensi pada sistem dilakukan dengan cara mengatur besar daya aktif. Suplai daya aktif harus disesuaikan dengan kebutuhan daya aktif beban, dalam hal ini dilakukan dengan mengatur torsi penggerak dari generator [6].

$$(T_G - T_B) = H \times \frac{d\omega}{dt} \quad (2.1)$$

Keterangan,

- T_G = Kopel penggerak generator
- T_B = Kopel beban yang membebani generator
- H = Momen inersia generator
- ω = Kecepatan sudut perputaran generator

Naik dan turunnya frekuensi sistem dipengaruhi oleh besar kecilnya daya aktif yang dibangkitkan oleh generator. Penurunan frekuensi merupakan akibat dari kurangnya pasokan daya aktif dari pembangkit untuk suplai kebutuhan beban. Dan sebaliknya, apabila frekuensi sistem naik, hal itu disebabkan oleh berlebihnya pasokan daya aktif dari sumber pembangkit dibandingkan kebutuhan beban. Naik turunnya nilai frekuensi dapat ditulis menjadi persamaan berikut,

$$T_G - T_B = \Delta T < 0, \text{ maka } \frac{d\omega}{dt} < 0, \text{ frekuensi turun} \quad (2.2)$$

$$T_G - T_B = \Delta T > 0, \text{ maka } \frac{d\omega}{dt} > 0, \text{ frekuensi naik} \quad (2.3)$$

Pada penggerak utama generator kita dapat melakukan pengaturan pembangkitan daya aktif generator. Sedangkan frekuensi sistem dapat diatur dengan melakukan pengaturan terhadap lebar sempitnya pembukaan katup bahan bakar penggerak utama [6].

2.2.3 Persamaan *Swing*

Dalam keadaan steady-state besar torsi mekanik dan torsi elektrik adalah sama,

$$T_m = T_e \quad (2.5)$$

Akibat adanya gangguan, maka terdapat selisih antara keduanya yang bernilai T_a ,

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.6)$$

Keterangan,

T_m = Torsi mekanik dari generator

T_e = Torsi elektrik dari generator

T_a = Selisih antara torsi mekanik dengan torsi elektrik

Dimisalkan J merupakan konstanta dari kombinasi momen inersia dari Turbin dan Generator, mengabaikan gesekan dan torsi *damping*, berdasar hukum gerak berputar didapatkan,

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.7)$$

dimana θ_m merupakan pergeseran sudut rotor yang mengacu pada referensi sumbu stasioner stator. Apabila dihubungkan dengan kecepatan sudut motor sinkron yaitu,

$$\theta_m = \omega_{sm} t - \delta_m \quad (2.8)$$

dimana δ_m adalah posisi rotor sebelum gangguan pada saat $t = 0$, diukur dari referensi putaran sinkron. Persamaan (2.8) apabila diturunkan maka akan menghasilkan persamaan kecepatan putar rotor,

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.9)$$

dan percepatan rotor adalah,

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (2.10)$$

dengan mensubstitusi persamaan (2.10) dengan (2.7) maka didapatkan,

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.11)$$

lalu persamaan (2.11) dikalikan dengan ω_m , maka didapatkan,

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.12)$$

Dimana $P = \omega T$ [7], maka didapatkan persamaan,

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.13)$$

Persamaan $J \omega_m$ merupakan konstanta inersia, yang bisa ditulis dengan konstanta M . Persamaan tersebut juga berhubungan dengan energi kinetik dari rotasi berbeban (W_k),

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2 \quad (2.14)$$

atau dapat ditulis menjadi,

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m^2} \quad (2.15)$$

Keterangan,

- J = Konstanta dari kombinasi momen inersia turbin dan generator
- θ_m = Pergeseran sudut rotor
- ω_{sm} = Kecepatan sudut elektrik
- δ_m = Sudut mekanik rotor
- ω_m = Kecepatan putar rotor
- P_m = Daya mekanik
- P_e = Daya elektrik
- W_k = Energi kinetik dari rotasi berbeban
- M = Konstanta inersia

Meskipun M disebut konstanta inersia, itu tidak benar-benar konstan ketika kecepatan rotor menyimpang dari kecepatan sinkron [5]. Namun, karena ω_m tidak berubah dengan jumlah besar sebelum stabilitas hilang, M dievaluasi pada kecepatan sinkron dan dianggap tetap konstan, yaitu,

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}^2} \quad (2.16)$$

Persamaan *swing* dalam ketentuan konstanta inersia menjadi,

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.17)$$

Lebih mudah untuk menulis persamaan ayunan dalam hal sudut tenaga listrik (δ). Jika p adalah jumlah kutub generator sinkron, sudut tenaga listrik (δ) terkait dengan sudut kekuatan mekanik (δ_m) oleh,

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (2.18)$$

serta,

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.19)$$

Persamaan *swing* dalam ketentuan sudut tenaga listrik menjadi,

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.20)$$

Karena analisis sistem daya dilakukan dalam sistem per unit, persamaan *swing* biasanya dinyatakan dalam per unit. Membagi persamaan (2.20) dengan *base power* (S_B), dan substitusi parameter M dari persamaan (2.15) menghasilkan,

$$\frac{2}{p} \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (2.21)$$

Lalu didefinisikan parameter H yang merupakan konstanta inersia dalam satuan per unit, didapatkan dari energi kinetik dalam MJ (Megajoule) saat *rated speed* yang dibagi dengan rating mesin dalam MVA, sehingga,

$$H = \frac{W_k}{\delta_B} \quad (2.22)$$

Satuan H adalah detik, dalam range 1 sampai 10 detik, tergantung dari ukuran dan tipe dari mesinnya. Kemudian substitusi persamaan (2.22) ke persamaan (2.21), didapatkan,

$$\frac{2}{p} \frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.23)$$

Kecepatan sudut listrik memiliki hubungan dengan kecepatan sudut mekanik, yaitu $\omega_{sm} = (2/p)\omega_s$. Lalu persamaan (2.23) diubah menjadi,

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.24)$$

Keterangan,

- δ = Sudut tenaga listrik
 p = Jumlah kutub generator sinkron
 S_B = Base power
 ω_s = kecepatan sudut mekanik

2.2.4 Pemodelan Generator

Pada gangguan kecil, persamaan *swing* dari mesin sinkron adalah,

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2.25)$$

Perubahan kecil pada kecepatan sehingga mengubah persamaan (2.25) menjadi,

$$\frac{d\Delta \frac{\omega}{\omega_s}}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (2.26)$$

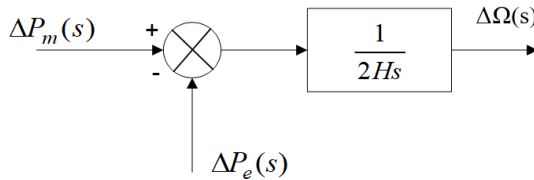
Kemudian kecepatan dinyatakan dalam satuan per unit (pu). Maka persamaannya adalah,

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (2.27)$$

Persamaan (2.27) ditransformasikan menjadi Laplace, sehingga didapatkan persamaan,

$$\Delta \Omega(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (2.28)$$

Persamaan bentuk Laplace (2.28) dinyatakan dalam diagram blok,



Gambar 2.3 Diagram Blok Generator

Keterangan,

$\Delta \Omega$ = Respon deviasi frekuensi

2.2.5 Pemodelan Beban

Peralatan listrik yang beraneka ragam dapat menimbulkan variasi beban pada sistem tenaga listrik. Beban motor sensitif terhadap perubahan

frekuensi, karena perubahan frekuensi mempengaruhi putaran atau daya elektrik motor. Sedangkan pada beban resistif, daya listriknya tidak bergantung pada frekuensi [5]. Perubahan daya elektrik akibat perubahan beban dinyatakan dalam persamaan,

$$\Delta P_e = \Delta P_L - D\Delta\omega \quad (2.29)$$

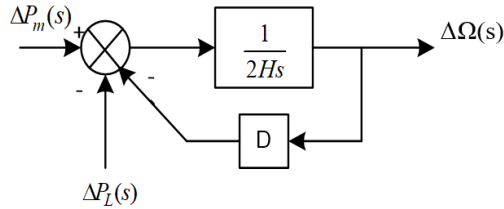
Keterangan,

ΔP_L = Perubahan Beban Tanpa Kepekaan Frekuensi

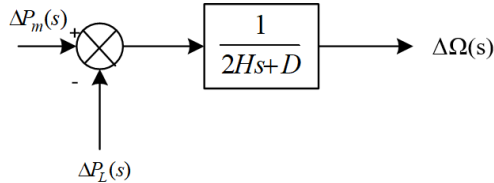
$D\Delta\omega$ = Sensitivitas Frekuensi Terhadap Perubahan Beban

D = Konstanta Redaman Beban (*Dumping Constant*)

Bentuk diagram blok dari persamaan (2.29) adalah,



Gambar 2.4 Diagram blok efek load damping



Gambar 2.5 Diagram blok efek load damping yang sederhana

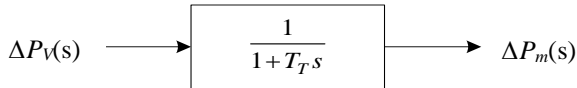
Pada gambar 2.5, konstanta damping memberikan efek peredaman akibat dari perubahan beban sehingga mengakibatkan terjadinya perubahan frekuensi.

2.2.6 Pemodelan Turbin

Sumber dari daya mekanik pada umumnya disebut sebagai penggerak mula (*prime mover*). Model turbin mempunyai hubungan dengan perubahan luaran daya mekanik (ΔP_m) untuk mengubah posisi katup uap (ΔP_v). Model sederhana penggerak utama turbin uap nonreheat didekati dengan waktu tunggal konstan (T_T). Didapatkan *transfer function* [5],

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_V(s)} = \frac{1}{1 + T_T s} \quad (2.30)$$

Diagram blok persamaan (2.30) adalah,

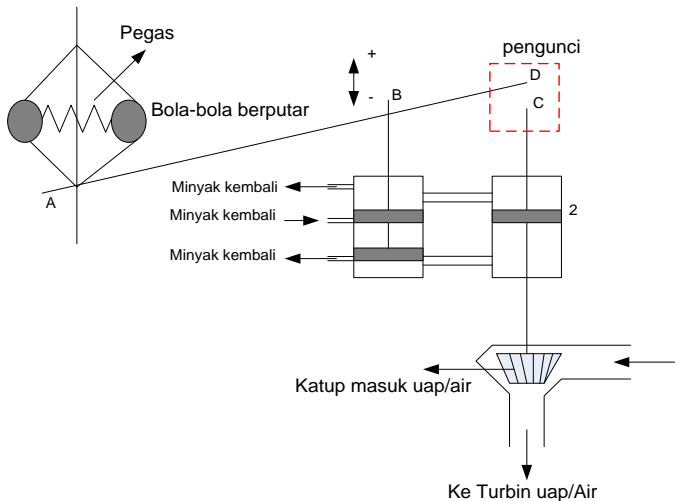


Gambar 2.6 Diagram Blok Turbin

Waktu konstan (T_T) berada pada kisaran waktu 0.2 sampai 2 detik.

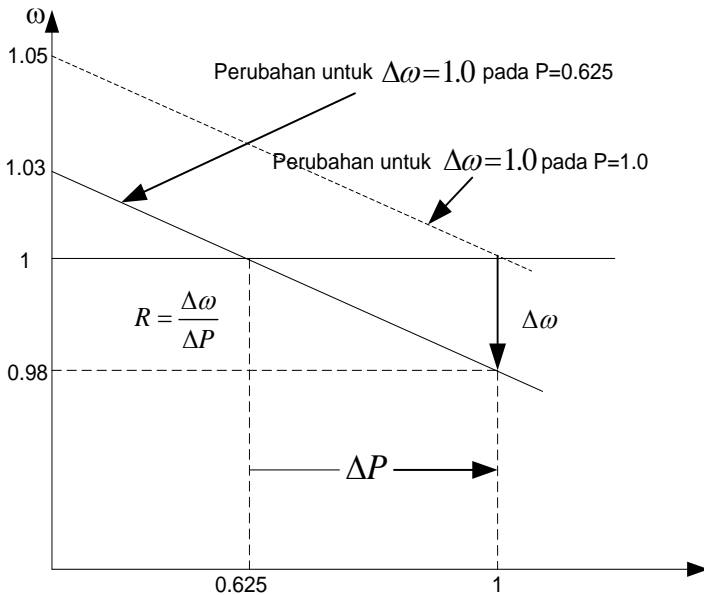
2.2.7 Pemodelan Governor

Pada saat beban elektrik generator naik secara signifikan, daya mekanik generator akan menjadi jauh lebih kecil daripada daya elektriknya. Penurunan daya elektrik ini menyebabkan penurunan pada energi kinetik, sehingga frekuensi generator dan kecepatan putar turbin juga mengalami penurunan. Kecepatan putar turbin yang mengalami penurunan dapat dideteksi dengan governor. Fungsi utama governor adalah sebagai aktuator (input) katup uap yang menjadi sumber pendorong penggerak mula (turbin) dengan tujuan untuk mengubah output daya mekanik dengan kecepatan yang stabil.



Gambar 2.7 Governor Watt

Governor Watt pada Gambar 2.7 menggunakan bola berputar untuk mendeteksi perubahan kecepatan, dengan mekanisme mekanik memberikan aksi kontrol kepada katup masukan dari penggerak mula [5]. Pada saat ω turun, maka bola-bola berputar akan bergerak, sehingga titik A turun, jika A turun maka titik B juga turun. Dengan turunnya titik B maka pompa sentrifugal pengarah minyak akan memompa minyak ke pemompa utama, sehingga katub pada pemompa utama terangkat ke atas untuk menambahkan uap air ke turbin uap. Saat uap bertambah maka putaran generator ikut bertambah sehingga frekuensi mulai bertambah dan perubahan frekuensi mulai berkurang. Secara matematis dapat ditulis, $\frac{df}{dt} = 0$ sehingga $T_G - T_B = 0$. Pada saat $T_G - T_B = 0$ penambahan uap tidak langsung berhenti karena governor membutuhkan waktu untuk kembali ke keadaan awal, akibatnya $\frac{df}{dt} > 0$, sehingga frekuensi naik, dan kemudian governor juga akan merespon perubahan frekuensi ini dengan mengurangi uap/air ke turbin. Hal ini akan terus terjadi secara dinamis sampai di dapat keadaan *steady state*.



Gambar 2.8 Karakteristik Kecepatan Governor

Karakteristik governor saat mengalami kondisi *steady-state* terdapat pada gambar 2.8. Governor juga memberikan batasan penurunan kecepatan turbin saat beban mengalami peningkatan. Kemiringan governor mempunyai syarat kecepatan tertentu yaitu 5% hingga 6% dari 0 sampai diperoleh keadaan penuh. Kecepatan governor mempunyai mekanisme yang berfungsi sebagai pembanding, yaitu output dari governor ΔP_g adalah hasil pengurangan antara daya referensi dengan $\frac{1}{R}\Delta\omega$ yang merupakan karakteristik governor. Persamaan matematik ditulis sebagai berikut [5],

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta\omega \quad (2.31)$$

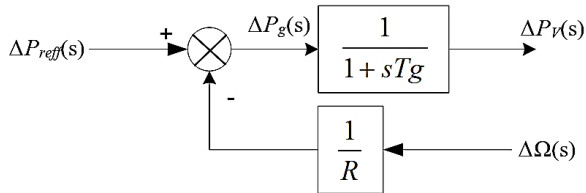
Persamaan (2.31) apabila dinyatakan dalam dominan s menjadi,

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta\Omega(s) \quad (2.32)$$

Transformasi ΔP_g ke penguatan hidrolis sebagai perintah posisi katup uap ΔP_V . Dapat diasumsikan bahwa hubungan sistem adalah linier dan mempertimbangkan ketetapan waktu governor (T_g), sehingga persamaan dalam domain s menjadi seperti berikut [],

$$\Delta P_V(s) = \frac{1}{1 + T_g s} \Delta P_g(s) \quad (2.33)$$

Dari persamaan (2.31) sampai (2.33) didapatkan blok diagram berikut,

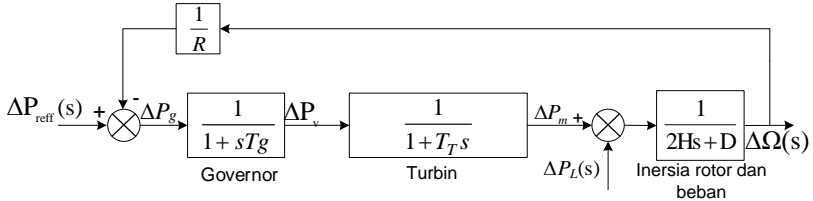


Gambar 2.9 Diagram Blok Governor

Pada Gambar 2.9 terdapat konstanta waktu serta umpan balik yaitu $1/R$. Umpan balik dan daya referensi akan bertemu pada titik penjumlahan dan menghasilkan daya governor. Output diagram blok yaitu $\Delta P_V(s)$.

2.2.8 Pemodelan LFC pada Sistem Tenaga Listrik *Single Area*

Sistem tenaga listrik single area merupakan sistem terisolasi dengan hanya terdapat satu pembangkit dan langsung teralirkan menuju beban. Dimana terdapat diagram blok dari generator, turbin, governor, dan beban yang digabungkan menjadi satu, sehingga didapatkan LFC sistem terisolasi sebagai berikut,

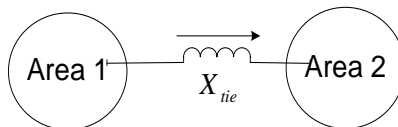


Gambar 2.10 Diagram Blok LFC Sistem *Single Area*

2.2.9 Pemodelan LFC pada Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi Dua Area

Untuk mempermudah pemodelan sistem interkoneksi dua area maka sistem dapat diasumsikan sebagai berikut,

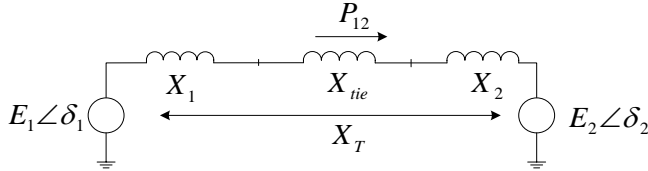
- Sebuah reaksi *tie line* (X_{tie}) menghubungkan sistem yang terdiri dari dua area.
- Sistem unit pembangkit ekuivalen yang memperlihatkan bentuk secara keseluruhan akan mewakili setiap area.
- Tahanan pada stator tidak diperhitungkan.
- Kejenuhan inti generator tidak diperhitungkan dan kondisi sistem dianggap seimbang.
- Beban yang dipakai adalah beban statik, yaitu beban dengan impedansi dianggap tetap.



Gambar 2.11 Sistem Interkoneksi Dua Area

Gambar 2.11 menunjukkan *electric equivalent circuit* pada sistem dua area, dimana terdapat reaktansi *tie line* (X_{tie}) menghubungkan kedua

area tersebut. Model gabungan seperti itu dapat diterima dengan tidak mempertimbangkan osilasi *intermachine* pada setiap area [3].



Gambar 2.12 Electrical Equivalent Sistem Interkoneksi Dua Area [3]

Pada Gambar 2.12 dapat diperhatikan bahwa setiap area mempunyai satu sumber tegangan dan satu reaktansi ekivalen yang dilihat dari *tie bus*. Persamaan aliran daya yang mengalir dari area satu ke area dua adalah,

$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.34)$$

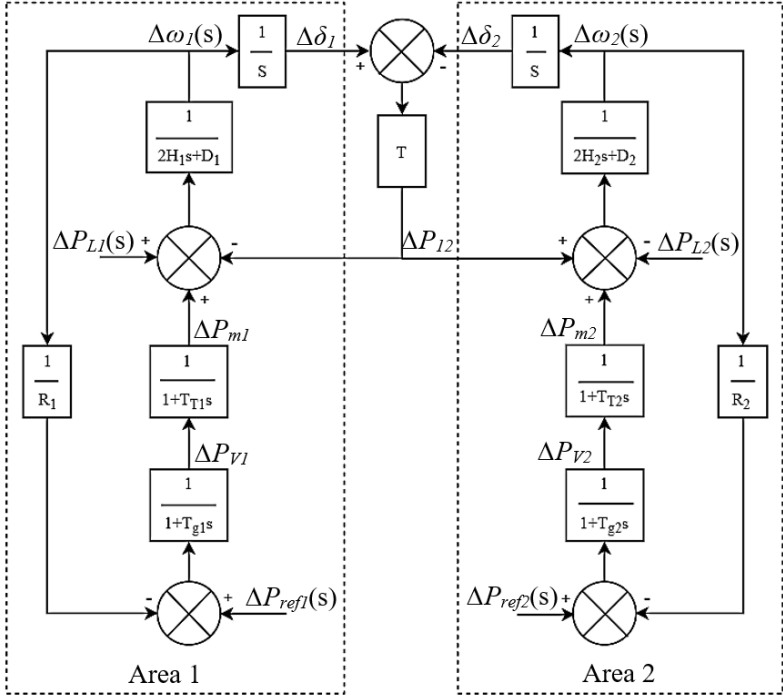
Linierisasi titik awal awal operasi dapat diwakili $\delta_1 = \delta_{10}$ dan $\delta_2 = \delta_{20}$ maka,

$$\Delta P_{12} = T \Delta \delta_{12} \quad (2.35)$$

Dengan T adalah koefisien torsi sinkron yang diperoleh dari persamaan,

$$T = \frac{E_1 E_2}{X_T} \cos(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.36)$$

Model linier keseluruhan sistem tenaga listrik dua area dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Model linier sistem tenaga listrik dua area [1]

Pada masing-masing area diagram blok sistem seperti gambar 2.13 diwakili oleh satu turbin dan sistem governor dengan *speed drop* efektif (R), momen inersia ekuivalen (H), dan konstanta *load damping* (D). Koefisien torsi sinkron (T) mewakili *tie line*. ΔP_{12} bernilai positif karena terjadi peningkatan dalam perpindahan daya dari area 1 menuju area 2. Maka tanda negatif pada umpan balik ΔP_{12} untuk area 1 dan tanda positif untuk area 2.

Keterangan,

H_1 = Momen Inersia Area 1

H_2 = Momen Inersia Area 2

D_1 = Load damping area 1

D_2 = Load damping area 2

T_{T1} = Konstanta Waktu Turbin Area 1

T_{T2} = Konstanta Waktu Turbin Area 2

T_{g1} = Konstanta Waktu Governor area 1
 T_{g2} = Konstanta Waktu Governor Area 2
 R_1 = *Speed Drop* Area 1
 R_2 = *Speed Drop* Area 2
 T = Koefisien Daya Sinkronisasi Antar Area
 Δf_1 = Perubahan Frekuensi Area 1
 Δf_2 = Perubahan Frekuensi Area 2
 ΔP_{G1} = Perubahan Level kutub Area 1
 ΔP_{G2} = Perubahan Level kutub Area 2
 ΔP_{M1} = Perubahan daya mekanik Area 1
 ΔP_{M2} = Perubahan daya mekanik Area 2
 ΔP_{tie} = Perubahan Transfer Daya antar Area

Deviasi frekuensi area 1 dan 2 adalah sama, yaitu tergantung perubahan beban ΔP_L . Persamaan dari perubahan frekuensi antar area adalah,

$$f - f_o = \Delta f = \Delta \omega_1 = \frac{-\Delta P_L}{(1/R_1 + 1/R_2) + (D_1 + D_2)} \quad (2.37)$$

Bila area 1 diberikan perubahan beban sebesar ΔP_{L1} , maka persamaan frekuensi area 1 dapat dinyatakan,

$$\Delta P_{m1} - \Delta P_{12} - \Delta P_{L1} = D_1 \Delta f \quad (2.38)$$

Sedangkan untuk area 2,

$$\Delta P_{m2} + \Delta P_{12} = D_2 \Delta f \quad (2.39)$$

Pada area 1 dan 2 perubahan daya mekanik tergantung pada peraturan *speed drop*, maka perubahan daya mekanik adalah,

$$\Delta P_{m1} = -\frac{\Delta f}{R_1} \quad (2.40)$$

$$\Delta P_{m2} = -\frac{\Delta f}{R_2} \quad (2.41)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan (2.40) dan persamaan (2.38) kemudian substitusi persamaan (2.41) ke dalam persamaan (2.39), maka diperoleh persamaan baru yakni,

$$\Delta f \left(\frac{1}{R_1} + D_1 \right) = -\Delta P_{12} - \Delta P_{L1} \quad (2.42)$$

$$\Delta f \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right) = \Delta P_{12} \quad (2.43)$$

Dengan asumsi bahwa,

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \left(\frac{1}{R_1} + D_1 \right) \\ \beta_2 &= \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right) \end{aligned} \quad (2.44)$$

maka persamaan (2.37) dapat dinyatakan dengan,

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_L}{(1/R_1 + D_1)/(1/R_2 + D_2)} = \frac{-\Delta P_L}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2.45)$$

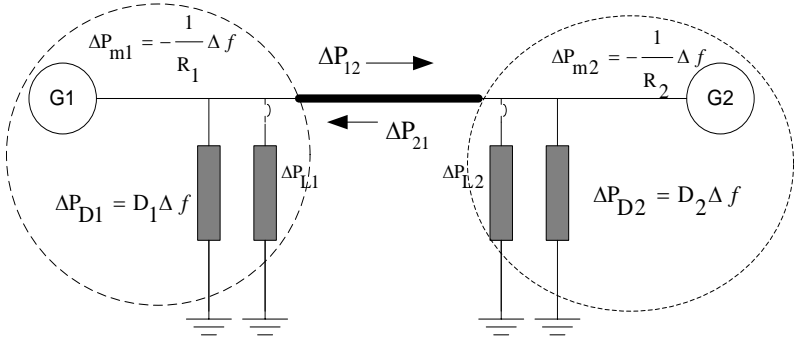
dan untuk daya area 1 dan 2 adalah,

$$\Delta P_{12} = \frac{-\Delta P_L (1/R_2 + D_2)}{(1/R_1 + D_1)/(1/R_2 + D_2)} = \frac{-\Delta P_L}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2.46)$$

Keterangan,

β_1 dan β_2 = Gabungan karakteristik respon frekuensi area 1 dan area 2.

Hubungan persamaan di atas dapat digambarkan sebagai berikut,



Gambar 2.14 Pengaruh perubahan beban pada area 1 dan area 2 [1]

Penambahan beban pada area 1 (ΔP_{L1}) mengakibatkan frekuensi kedua area menjadi menurun, demikian halnya dengan transfer daya pada *Tie-line* (ΔP_{12}). ΔP_{12} bernilai negatif menandakan terjadinya aliran daya dari area 2 menuju area 1. Deviasi aliran daya pada jaringan mencerminkan kontribusi dari karakteristik regulasi $\left(\frac{1}{R_1+D}\right)$ antar area. Sehingga dengan cara yang sama apabila terjadi perubahan beban pada area 2, maka didapatkan persamaan frekuensi dan daya sebagai berikut,

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_L}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2.47)$$

$$\Delta P_{12} = -\Delta P_{12} = \frac{-\Delta P_L \beta_1}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2.48)$$

2.3 Kontroler Proportional Integral Differential

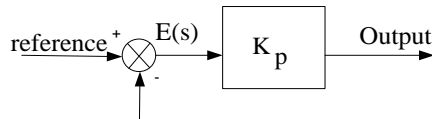
Suatu sistem tidak lepas dari adanya gangguan yang dapat menyebabkan munculnya suatu nilai error. Akibat adanya error ini maka perilaku sistem mengalami perubahan sehingga dapat menyebabkan sistem tidak stabil. Disinilah diperlukan peranan kontroler guna mereduksi sinyal error dan memperkecil kesalahan yang terjadi.

Salah satu kontroler yang banyak digemari di industri adalah PID. PID bekerja dengan cara mengambil sinyal error yang diolah dengan menjumlahkan parameter setting PID, yaitu controller proporsional, integral, dan differensial. Dalam penentuan parameter tersebut harus meninjau fungsi alih sebuah plant (sistem) dan menentukan spesifikasi performansi respon orde yang diinginkan dahulu, barulah nilai parameter tersebut bisa kita tentukan. Secara heuristik, parameter tersebut dapat ditafsirkan berdasar segi waktu, dimana P adalah kesalahan saat ini (dalam simulasi dilambangkan dengan K_p), I adalah akumulasi kesalahan di masa lampau (τ_i), serta D adalah prediksi kesalahan dimasa yang akan datang dengan memperhitungkan tingkat kesalahan saat ini (τ_d) [8].

2.3.1 Kontroler Proporsional

Keluaran kontrol proporsional sebanding atau proporsional dengan besarnya sinyal *error* (selisih antara besaran yang *reference* dengan harga aktualnya). Keluaran kontroler proporsional merupakan hasil kali antara gain proporsional dengan sinyal inputnya. Perubahan pada sinyal input menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya.

Gambar 2.15 menunjukkan blok diagram hubungan antara besaran *setting*, besaran aktual dengan besaran keluaran kontroler proporsional. Sinyal kesalahan merupakan selisih antara besaran *setting* dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi kontroler, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga *setting*) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).



Gambar 2.15 Diagram blok kontroler proporsional

Kontroler proporsional memiliki konstanta proporsional yang merupakan nilai faktor penguatan terhadap sinyal kesalahan (K_p). Dalam penggunaannya kontroler proporsional harus memperhatikan ketentuan-ketentuan berikut ini:

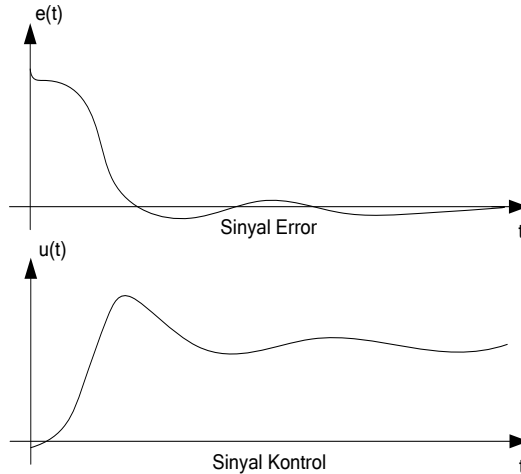
1. Jika nilai K_p kecil maka kontroler proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
2. Kalau nilai K_p dinaikkan maka respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan mantap.
3. Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi.

2.3.2 Kontroler Integral

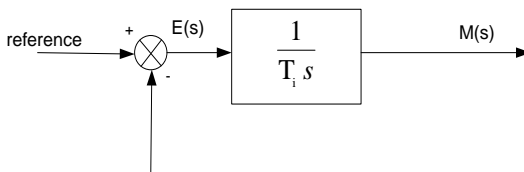
Fungsi kontroler integral adalah menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Kalau sebuah plant tidak memiliki unsur integrator ($1/s$), kontroler proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol. Dengan kontroler integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan mantapnya nol.

Kontroler integral memiliki karakteristik seperti halnya sebuah integral. Keluaran kontroler dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran kontroler ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Kalau sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan.

Sinyal keluaran kontroler integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal kesalahan berharga nol. Gambar 2.16 menunjukkan contoh sinyal kesalahan yang diinputkan ke dalam kontroler integral dan keluaran kontroler integral terhadap perubahan sinyal kesalahan tersebut.



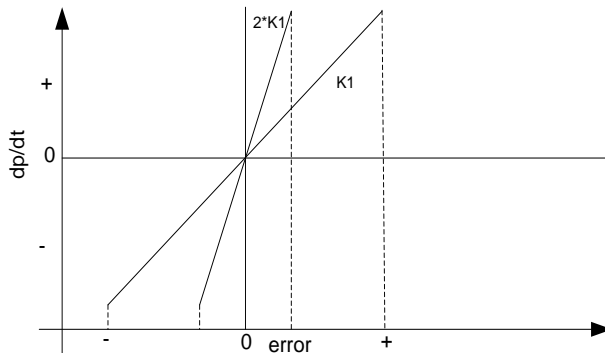
Gambar 2.16 Kurva sinyal kesalahan $e(t)$ terhadap t dan kurva $u(t)$ terhadap t pada pembangkit kesalahan nol



Gambar 2.17 Diagram Blok hubungan antara besaran kesalahan dengan kontroler integral

Pengaruh perubahan konstanta integral terhadap keluaran ditunjukkan oleh Gambar 2.18. Ketika sinyal kesalahan berlipat ganda, maka nilai laju perubahan keluaran kontroler berubah menjadi dua kali dari semula. Jika nilai konstanta integrator berubah menjadi lebih besar,

sinyal kesalahan yang relatif kecil dapat mengakibatkan laju keluaran menjadi besar.



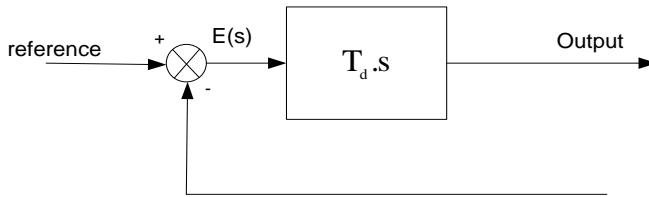
Gambar 2.18 Perubahan keluaran sebagai akibat penguatan dan kesalahan

Ketika digunakan, kontroler integral mempunyai beberapa karakteristik berikut ini,

1. Keluaran kontroler membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga kontroler integral cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran kontroler akan bertahan pada nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i .
4. Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Tetapi semakin besar nilai konstanta K_i akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran kontroler.

2.3.3 Kontroler Diferensial

Keluaran kontroler diferensial memiliki sifat seperti halnya operasi derivatif. Perubahan yang tiba-tiba pada masukan kontroler, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Gambar 2.20 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara sinyal kesalahan dengan keluaran kontroler.



Gambar 2.19 Diagram blok kontroler diferensial

Ketika masukannya tidak mengalami perubahan, keluaran kontroler juga tidak mengalami perubahan, sedangkan apabila sinyal masukan berubah mendadak dan menaik (fungsi *step*), keluaran menghasilkan sinyal berbentuk impuls. Jika sinyal masukan berubah naik secara perlahan (fungsi *ramp*), keluarannya justru merupakan fungsi *step* yang besar magnitudonya sangat dipengaruhi oleh kecepatan naik dari fungsi *ramp* dan faktor konstanta diferensialnya T_d .

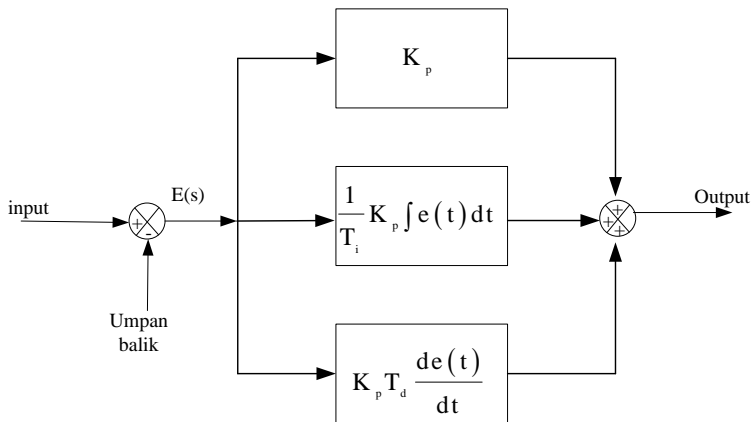
Karakteristik kontroler diferensial adalah sebagai berikut:

1. Kontroler ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan).
2. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan kontroler tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.
3. Kontroler diferensial mempunyai suatu karakter untuk mendahului, sehingga kontroler ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum pembangkit kesalahan menjadi sangat besar. Jadi kontroler diferensial dapat mengantisipasi pembangkit kesalahan, memberikan aksi yang bersifat korektif, dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem

Berdasarkan karakteristik kontroler tersebut, kontroler diferensial umumnya dipakai untuk mempercepat respon awal suatu sistem, tetapi tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya. Kerja kontroler diferensial hanyalah efektif pada lingkup yang sempit, yaitu pada periode peralihan. Oleh sebab itu kontroler diferensial tidak pernah digunakan tanpa ada kontroler lain sebuah sistem.

2.3.4 Kontroler Proporsional, Integral, dan Diferensial

Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kontroler P , I , dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi kontroler proporsional ditambah integral ditambah diferensial (kontroler PID). Komponen-komponen kontroler P , I , dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Gambar 2.20 menunjukkan blok diagram kontroler PID.



Gambar 2.20 Diagram blok kontroler PID

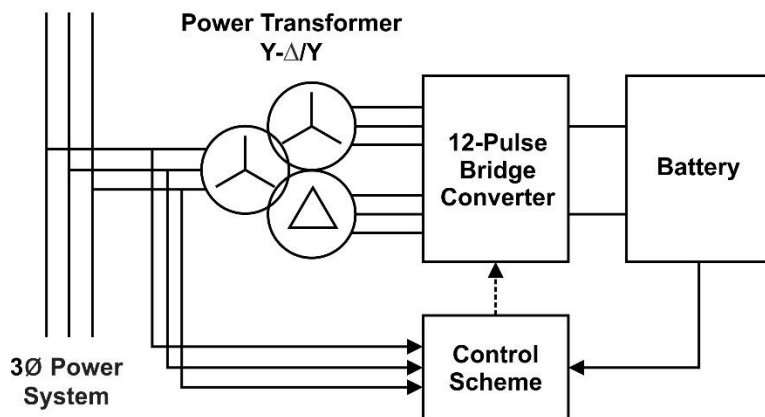
Keluaran kontroler PID merupakan jumlahan dari keluaran kontroler proporsional, keluaran kontroler integral dan keluaran kontroler diferensial. Karakteristik kontroler PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P , I dan D . Penentuan konstanta K_p , T_i , dan T_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat diatur lebih dominan dibanding yang lain. Konstanta yang dominan itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

2.4 Battery Energy Storage System

Salah satu alternatif untuk meningkatkan keandalan pasokan energi listrik selama periode beban puncak adalah penggunaan fasilitas penyimpanan energi dan sistem yang paling baik saat ini adalah sistem baterai penyimpan energi (*Battery Energy Storage System*, BESS).

Aplikasi dari BESS telah mendapat perhatian besar sejak demonstrasi sukses di fasilitas 17 MW BES di Berlin [9] dan fasilitas 10 MW / 40 MWh di California [10]. Lalu perkembangan BES terus melonjak pesat hingga akhirnya Mitsubishi berhasil menginstal sistem penyimpanan energi berkapasitas 50 MW / 300 MWh di Buzen, Prefektur Fukuoka, Jepang pada tahun 2016 [11] serta Tesla juga telah berhasil menginstal BESS terbesar dengan kapasitas 100 MW / 129 MWh di dekat Jamestown, Australia Selatan pada akhir tahun 2017 [12]. BESS dengan kapasitas lebih dari 300 MW terus dikembangkan, saat ini Vistra Energy bekerja sama dengan PG&E telah melakukan pembangunan BESS dengan kapasitas 300 MW / 1200 MWh di California, USA [13].

Teknologi penyimpanan energi baterai dalam aplikasi sistem tenaga telah beroperasi sejak awal 1900-an. Para penulis di Goldsbrough dan Fansler (1903) membahas penggunaan baterai sebagai equalizer dan menerapkan tes pada gardu distribusi yang memasok Perusahaan Union Traction of Indiana pada tahun 1902. Kontrol frekuensi beban adalah salah satu dari aplikasi penggunaan BESS. Penyediaan BESS di LFC sedang dibahas oleh para peneliti sejak pertengahan 1980-an setelah Kunisch et al. mengusulkan fasilitas demonstrasi BES pertama yang efektif sebagai pendekatan untuk meningkatkan kinerja kontrol LFC di Jerman-1986 [14].



Gambar 2.21 Deskripsi schematic dari BESS [14]

BESS dapat digunakan dalam berbagai aspek sistem daya. Keuntungan dari BESS termasuk peningkatan frekuensi sistem terutama ketika BESS digunakan untuk kontrol frekuensi sistem. Dalam kasus gangguan kecil, BESS digunakan ketika frekuensi sistem lebih rendah dari 50 Hz. Di sisi lain BESS sedang mengisi daya ketika frekuensi sistem lebih tinggi dari 50 Hz. Dalam kasus gangguan besar, BESS dapat meningkatkan kinerja kontrol frekuensi sistem dengan mengintegrasikan BESS dengan skema pemadaman beban *under frequency*. Dengan fungsi-fungsi yang berbeda ini, BESS dapat menawarkan solusi yang baik. Dapat disimpulkan bahwa BESS adalah elemen cepat dan fleksibel untuk sistem daya [8]. Namun, pemasangan BESS dengan ukuran terlalu besar atau tidak tepat dapat menyebabkan permasalahan frekuensi pada sistem serta dapat meningkatkan biaya. Untuk alasan ini, ukuran optimal BESS merupakan faktor penting untuk sistem [15].

Karena BES dapat memberikan kompensasi daya aktif cepat, itu juga dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja *Load Frequency Control* (LFC). Masalah LFC pada dasarnya adalah gangguan beban kecil tiba-tiba yang terus menerus mengganggu operasi normal pada sistem tenaga. Namun, BES dapat memberikan tindakan penyimpanan energi cepat untuk membantu LFC untuk menekan osilasi sistem setelah gangguan beban [16].

2.4.1 Karakteristik BESS

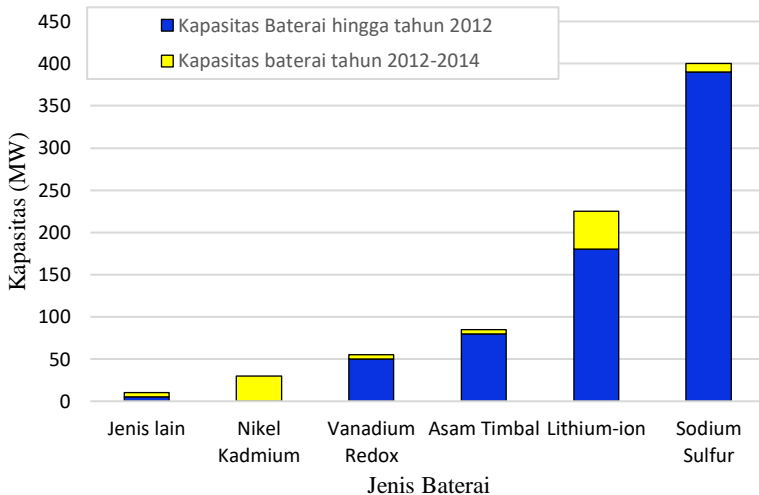
Sistem penyimpanan energi baterai terdiri dari tiga modul utama [17],

- Paket baterai: satu set sel baterai terhubung dalam konfigurasi seri/paralel.
- Modul pengkondisian daya: konverter elektronik daya yang digunakan untuk menghubungkan BESS dengan grid.
- Modul kontrol dan perlindungan: memantau status pengisian baterai (*state of charge*, SoC) untuk memastikan bahwa baterai memiliki daya yang diperlukan untuk aplikasinya, mengontrol pengisian dan pengosongan daya baterai sebagai tanggapan terhadap variabel kontrol sistem dan menyediakan fungsi perlindungan dan keselamatan.

Secara umum, baterai sekunder yang digunakan dalam aplikasi sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua kategori,

- Baterai konvensional : Asam Timbal, Nikel Kadmium, Sodium Sulfur, Lithium-ion
- *Flow batteries* : Baterai Vanadium Redox

Sodium Sulfur adalah teknologi baterai matang yang banyak digunakan dalam aplikasi grid [18]. Gambar 4 menunjukkan perkiraan kapasitas total kimia penyimpanan baterai yang berbeda yang dipasang di seluruh dunia untuk aplikasi sistem tenaga. Lithium-ion tumbuh dengan cepat, dan diharapkan menjadi dominan dalam waktu dekat. Namun, Lithium-ion masih menghadapi biaya produksi yang tinggi dibandingkan baterai lain. Salah satu alasan biaya tinggi paket Lithium-ion adalah bahwa mereka membutuhkan sirkuit perlindungan canggih karena mereka sangat rentan terhadap kondisi *overcharge* dan *overheating*. Sistem perlindungan meningkatkan biaya paket Lithium-ion sebesar 25% dan berat mereka hingga 50% [19]. Baterai NiMH masih merupakan salah satu teknologi baterai populer yang digunakan dalam industri transportasi elektrik. Oleh karena itu, teknologi baterai ini dapat menjadi pilihan lain yang diinginkan karena keunggulan tingkat keselamatan, biaya rendah, kepadatan energi yang tinggi, siklus hidup yang Panjang [20].



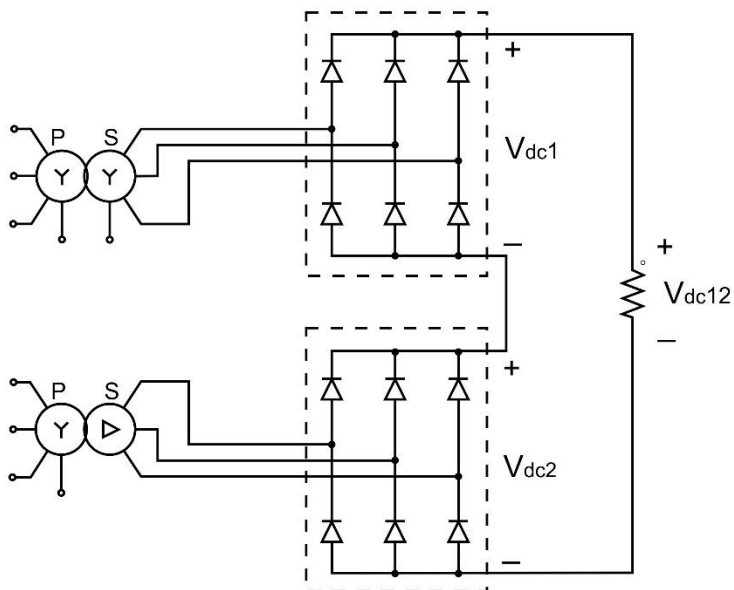
Gambar 2.22 Estimasi kapasitas total baterai di seluruh dunia yang telah terpasang pada aplikasi sistem tenaga [18]

Kedua kategori yang disebutkan pada dua paragraf sebelumnya juga dapat ditemukan dalam aplikasi LFC. Penggunaan sistem baterai

Sodium Sulfur (NaS) diperkenalkan di Jepang pada tahun 2012 [21]. Efektivitas sistem baterai NaS dalam mengkompensasi fluktuasi generasi dikonfirmasi pada sistem dua area. Pada kategori *flow batteries*, kemampuan untuk memperbaiki LFC sangat luar biasa. *Flow batteries* memiliki kemampuan daya tinggi, daya tahan, tanpa self-discharge dan waktu respon yang cepat. Namun, ada beberapa kelemahan dalam menggunakan baterai Redox, seperti biaya instalasi yang tinggi, kompleksitas, dan kepadatan energi yang rendah dibandingkan dengan baterai konvensional [22].

2.4.2 Konverter 3 fasa 12-pulsa

Penyearah 3 fasa 12-pulsa merupakan penyearah yang terdiri dari dua buah penyearah 6-pulsa. Tegangan outputnya (V_{dc12}) merupakan penjumlahan dari 2 buah tegangan output dari penyearah 6 pulsa (V_{dc1} dan V_{dc2}).



Gambar 2.23 Rangkaian penyearah 12 pulsa [23]

Adapun penyearah 6 pulsa memiliki bentuk gelombang tegangan output seperti gambar 2.23. Penyearah 6 pulsa memiliki lebar puncak 60° , sehingga batas-batas pada kurva sinusoida kuadran pertama adalah 60° dan 120° . Dengan nilai amplitude yang merupakan harga maksimum tegangan line-to-line, didapatkan tegangan dc output rata-rata yang merupakan luasan gelombang tegangan, dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 V_{avg} &= \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) d\omega t = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V_{m-LN} \sin(\omega t) d\omega t \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V_{m-LN}}{\pi} \cos \alpha
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

Dimana V_{m-LN} merupakan tegangan maksimum line-to line, dengan nilai $V_{m-LN} = \sqrt{2}V_{LN}$, maka,

$$V_{avg} = \frac{3\sqrt{6}V_{LN}}{\pi} \cos \alpha \tag{2.50}$$

Dengan demikian, persamaan penyearah 3 fasa 12-pulsa adalah,

$$V_{avg} = \frac{3\sqrt{6}V_{LN}}{\pi} \cos \alpha_1 + \frac{3\sqrt{6}V_{LN}}{\pi} \cos \alpha_2 \tag{2.51}$$

Dengan $V_{LN} = E_t$, maka didapatkan persamaan tegangan output dari BESS sebagai berikut,

$$V_{avg} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_t (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \tag{2.52}$$

2.4.3 Pemodelan BESS

Pada Gambar 2.23 (halaman 28) dapat dilihat bahwa dasar konfigurasi ekuivalen dari BESS berisi baterai dengan beberapa sel baterai yang terhubung secara paralel/seri, konverter 12-pulsa yang terhubung dengan transformer Y / Δ -Y, dan sebuah skema kontroler. Persamaan tegangan output dari baterai dapat ditulis sebagai berikut,

$$E_{bt} = V_{avg} - R_c I_{BESS} \tag{2.53}$$

$$= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_t (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) - \frac{6}{\pi} X_{co} I_{BESS}$$

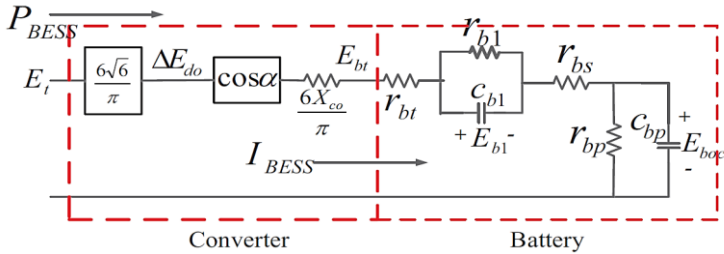
Dimana α adalah sudut penyalan yang dikontrol menggunakan *thyristor*. Dengan mengatur nilai α , maka dapat memainkan pengaturan konverter sehingga hanya menghasilkan daya aktif saja. Hanya penambahan daya aktif yang diperhitungkan dalam LFC. Oleh sebab itu didapatkanlah nilai α yaitu sebagai berikut,

$$\alpha_1 = -\alpha_2 = \alpha \quad (2.54)$$

Maka persamaan (2.53) menjadi,

$$E_{bt} = \frac{6\sqrt{6}}{\pi} E_t (\cos \alpha) - \frac{6}{\pi} X_{co} I_{BESS} \quad (2.55)$$

Rangkaian ekuivalensi BESS dapat direpresentasikan sebagai konverter yang dihubungkan ke baterai dengan nilai kosinus yang sama, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.55). Maka rangkaian ekuivalen dari BESS adalah sebagai berikut,



Gambar 2.24 Rangkaian ekivalen dari BESS [16]

Berdasarkan rangkaian ekivalen BESS, arus DC yang mengalir ke baterai dapat dinyatakan dengan,

$$I_{BESS} = \frac{E_{bt} - E_{boc} - E_{b1}}{r_{bt} + r_{bs}} \quad (2.56)$$

Kemudian didapatkan persamaan tegangan kapasitansi baterai sebagai berikut,

$$E_{b1} = \frac{1}{C_{b1}} \int I_{cb1} dt \quad (2.57)$$

$$\frac{d}{dt} E_{b1} = \frac{1}{c_{b1}} I_{cb1}$$

Apabila arus baterai mengalami deviasi, maka I_{cb1} dan E_{b1} juga akan mengalami perubahan nilai, persamaan (2.55) akan menjadi,

$$\frac{d}{dt} \Delta E_{b1} = \frac{1}{c_{b1}} \Delta I_{cb1} \quad (2.58)$$

Persamaan arus kapasitansi baterai dapat ditulis seperti berikut,

$$I_{cb1} = \frac{r_{b1}}{r_{b1} + X_{cb1}} I_{BESS} \quad (2.59)$$

Demikian juga apabila terdapat deviasi arus, maka persamaan (2.59) akan menjadi,

$$\Delta I_{cb1} = \frac{r_{b1}}{r_{b1} + X_{cb1}} \Delta I_{BESS} \quad (2.60)$$

Substitusi persamaan (2.56) dengan persamaan (2.58), maka didapatkan,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta E_{b1} &= \frac{1}{c_{b1}} \frac{r_{b1}}{(r_{b1} + X_{cb1})} \Delta I_{BESS} \\ \frac{d}{dt} \Delta E_{b1} &= \frac{r_{b1}}{(c_{b1} r_{b1} + \frac{1}{\omega})} \Delta I_{BESS} \end{aligned} \quad (2.61)$$

Transformasi laplace dari persamaan (2.61) adalah sebagai berikut,

$$s \Delta E_{b1} = \frac{r_{b1}}{(\frac{1}{\omega} + c_{b1} r_{b1})} \Delta I_{BESS} \quad (2.62)$$

Dimana E_{b1} merupakan jumlah tegangan kapasitansi yang telah mengalami deviasi, serta ditentukan suatu konstanta baru yaitu,

$$T_{b1} = r_{b1} c_{b1} \quad (2.63)$$

Maka persamaan (2.62) dapat ditulis menjadi,

$$E_{b1} = \frac{r_{b1}}{1 + s T_{b1}} (I_{BESS}^o + \Delta I_{BESS}) \quad (2.64)$$

Dengan cara yang sama, persamaan untuk tegangan kapasitansi E_{boc} adalah,

$$E_{boc} = \frac{r_{bp}}{1 + sT_{bp}} (I_{BESS}^o + \Delta I_{BESS}) \quad (2.65)$$

Dengan, $T_{bp} = r_{bp}C_{bp}$ (2.66)

Dari analisis rangkaian konverter, daya aktif dan reaktif yang diserap oleh BESS adalah [16],

$$P_{BESS} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_t I_{BESS} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (2.67)$$

$$Q_{BESS} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_t I_{BESS} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) \quad (2.68)$$

Maka persamaan (2.67) dan (2.68) apabila disubstitusikan dengan persamaan (2.54) menjadi,

$$P_{BESS} = \frac{6\sqrt{6}}{\pi} E_t I_{BESS} (\cos \alpha) \quad (2.69)$$

$$Q_{BESS} = 0 \quad (2.70)$$

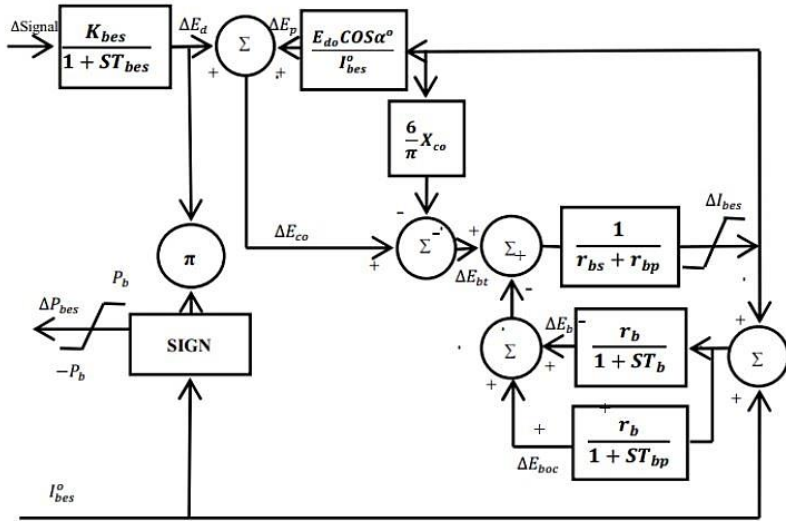
Lalu didapatkan persamaan deviasi daya BESS,

$$\Delta P_{BESS} = I_{BESS} \Delta E_d \quad (2.71)$$

Penggunaan BESS dalam LFC adalah untuk mencapai sinyal *damping* (ΔE_d). Dengan pemberian *feedback* berupa Δf untuk memberikan efek *damping*, maka diperoleh nilai ΔE_d sebagai berikut [15],

$$\Delta E_d = \frac{K_{bes}}{1 + ST_{bes}} \Delta f \quad (2.72)$$

Dari persamaan (2.53) hingga (2.72), maka didapatkan blok diagram yang telah dilinierisasi sebagai berikut,



Gambar 2.25 Diagram blok BESS yang telah dilinearisasi [15]

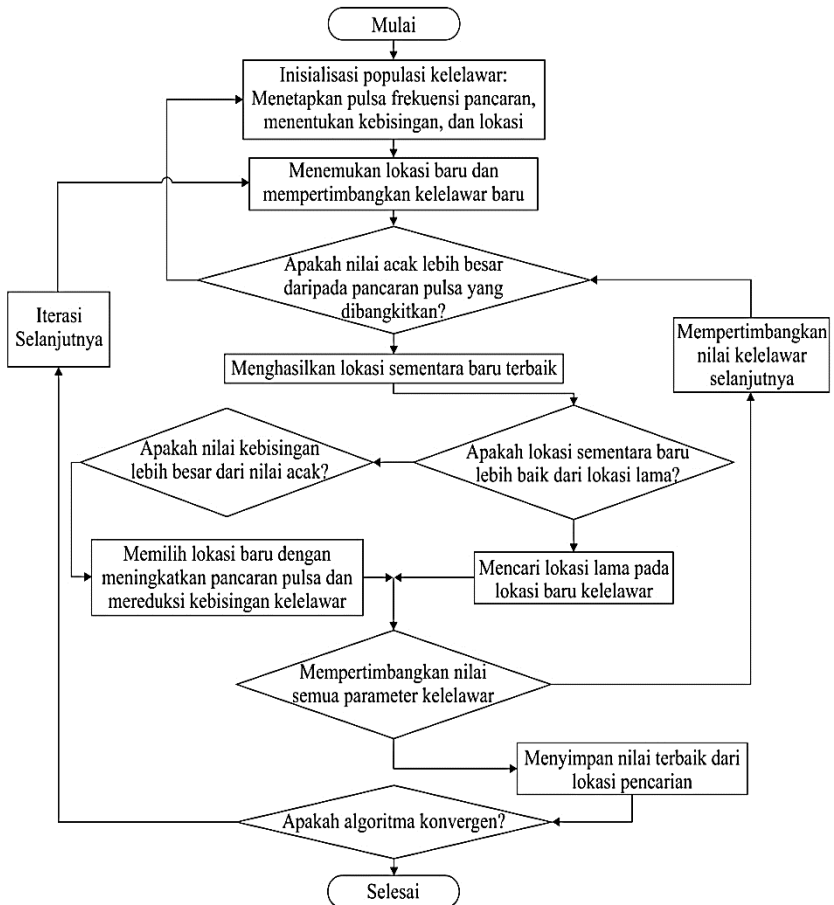
Keterangan,

- α_i = sudut tunda pengaktifan konverter i .
- E_{d0} = tegangan DC maksimum dari baterai.
- E_{b1} = *overvoltage* baterai.
- E_{bt} = tegangan terminal ekivalen baterai.
- E_{boc} = tegangan *open circuit* baterai.
- I_{BESS} = arus DC menuju baterai.
- P_{BESS} = daya aktif yang disediakan oleh baterai.
- r_{bt} = hambatan penghubung.
- r_{bs} = resistansi internal baterai.
- r_{bp} = resistansi *self discharge*.
- r_{b1} = resistansi *overvoltage*.
- Δf = defiasi frekuensi.
- X_{co} = reaktansi komutasi.
- ΔE_{co} = tegangan DC tanpa *overlap*.
- K_b = kontrol gain loop pada konverter.
- T_b = pengukuran waktu konstan dari perangkat.

2.5 Bat Algorithm

Bat Algorithm (BA) merupakan algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku kelelawar yang diperkenalkan oleh Xin She Yang pada tahun 2010 [24]. BA merupakan algoritma yang dapat menyelesaikan berbagai macam permasalahan yang ada, seperti optimisasi, klasifikasi, proses gambar, seleksi pilihan, penjadwalan, penggalian data, penalaan, dan yang lain. BA dapat diterapkan di berbagai macam persoalan dan dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan. BA menawarkan penyelesaian permasalahan yang lebih efisien dan efektif apabila dibandingkan dengan algoritma lain. Pada saat ini, berbagai macam permasalahan mulai diselesaikan dengan BA karena kelebihan yang dimiliki oleh BA.

Bat Algorithm (BA) merupakan metode yang diadopsi dari perilaku seekor kelelawar. Kelelawar menggunakan ekolokasi (*echolocation*) untuk mendeteksi posisi mereka. Dengan kemampuan ini mereka dapat mendeteksi mangsa, menghindari penghalang, dan juga menentukan posisi bahkan dalam keadaan gelap. Kelelawar mengeluarkan sinyal suara yang keras untuk memperoleh pantulan dari objek sekelilingnya. Sinyal suara yang dihasilkan bervariasi sifatnya sehingga dapat dihubungkan dengan strategi perburuan mereka, tergantung spesiesnya. Kelelawar dapat mengatur frekuensi atau panjang gelombang dari pulsa yang mereka keluarkan tergantung dari kecepatan terbang dan posisi. Setiap sinyal pulsa yang dikeluarkan oleh kelelawar berlangsung hanya seperseribu detik (milidetik) dengan frekuensi yang konstan yaitu berada pada 25KHz–150KHz. Setiap gelombang ultrasonik yang dikeluarkan rata-rata berlangsung dari 5 sampai 20 milidetik, dan kelelawar kecil mengeluarkan 10 sampai 20 kali gelombang setiap detik. Ketika mereka berburu mangsa, rata-rata emisi pulsa dapat dipercepat sampai 200 pulsa per detik, ketika mereka sedang terbang mendekati mangsa. Gelombang suara (gelombang pendek) menjadi kemampuan khusus dari kelelawar dalam mengolah sinyal. Sebuah studi menunjukkan bahwa kemampuan *sampling* suara dari kelelawar dapat mencapai 300–400 mikrodetik (μ s).



Gambar 2.26 Flowchart dari *Bat Algorithm* [25]

Langkah utama dari BA adalah dimulai dari inisialisasi populasi sekumpulan kelelawar yang masing-masing ditentukan oleh posisi awal sebagai solusi awal. Populasi sekumpulan kelelawar membangkitkan pulsa dan kebisingan secara acak serta menentukan frekuensi. Selama proses berulang (*looping*) kelelawar akan bergerak dari solusi awal menuju solusi terbaik. Setelah pindah, jika ada kelelawar menemukan solusi yang lebih baik, maka kelelawar akan memperbarui tingkat

pancaran pulsa dan kebisingan. Selama proses iterasi solusi terbaik selalu diperbarui. Proses iterasi diulang sampai kriteria berhenti dan kriteria solusi terbaik telah terpenuhi. Solusi terbaik adalah solusi bagi permasalahan yang diselesaikan oleh melalui proses algoritma ini.

Berikut ini adalah *Pseudo code* dari *Bat Algorithm* (BA) adalah sebagai berikut [26]:

Fungsi Objektif $f(x)$, dengan $x = (x_1, \dots, x_d)^T$

Inisialisasi populasi Bat algorithm $x_i, i = 1, 2, \dots, n$, dan v_i secara acak

Definisikan frekuensi f_i dengan merujuk pada x_i

Inisialisasi tingkat pulsa r_i dan *loudness* (kebisingan) A_i secara acak

While ($t < \text{Maksimum Iterasi}$)

Bangkitkan solusi baru dengan mengatur frekuensi

Perbarui kecepatan dan lokasi/ solusi menggunakan persamaan berikut,

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta,$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_*)f_i,$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t,$$

if $\text{rand} > r_i$

Pilih solusi dari yang terbaik

Bangkitkan solusi lokal dari solusi terbaik yang terpilih

end if

if ($\text{rand} < A_i$) && ($f(x_i) < f(x_*)$)

Didapatkan solusi baru

Naikkan nilai r_i dan kurangi nilai A_i

end if

end while

Keterangan:

f_i = Frekuensi yang dicari.

f_{\min} = Frekuensi minimum.

f_{\max} = Frekuensi maksimum.

β = Vektor acak.

v_i = Kecepatan yang dicari.

x_i = Posisi yang dicari.

x_* = Solusi posisi ideal.

r_i = Tingkat emisi pulsa.

A_i = Kebisingan kelelawar.

$\beta \in [0,1]$ adalah vektor acak yang diambil dari distribusi yang merata. Diketahui x^* adalah solusi global yang memiliki kecocokan terbaik dan terkini, dengan diletakkan setelah membandingkan semua solusi sejumlah n kelelawar. Hasil kali dari λ_i dan f_i adalah konstan, sehingga dapat digunakan f_i atau λ_i untuk mengatur perubahan kecepatan. Selama menetapkan variabel λ_i atau f_i , tergantung pada masalah yang diselesaikan. Implementasinya digunakan $f_{\min} = 0$ dan $f_{\max} = 0$ atau 1, tergantung ukuran domain dari masalah yang ingin diselesaikan. Awalnya setiap kelelawar diinisiasi secara acak yaitu pada variabel frekuensi yang diambil secara tidak merata dari $[f_{\min}, f_{\max}]$.

Kenyaringan A_i dan rata-rata tingkat emisi pulsar r_i harus diperbarui sesuai dengan proses iterasi. Kenyaringan menurun setelah kelelawar telah menemukan mangsa, sedangkan laju gelombang emisi meningkat. Kenyaringan dapat dipilih sebagai salah satu nilai yang tepat. Untuk mempermudah, dapat juga menggunakan $A_0 = 1$ dan $A_{\min} = 0$, dengan asumsi $A_{\min} = 0$ yang berarti kelelawar baru saja menemukan mangsa dan untuk sementara berhenti memancarkan suara apapun.

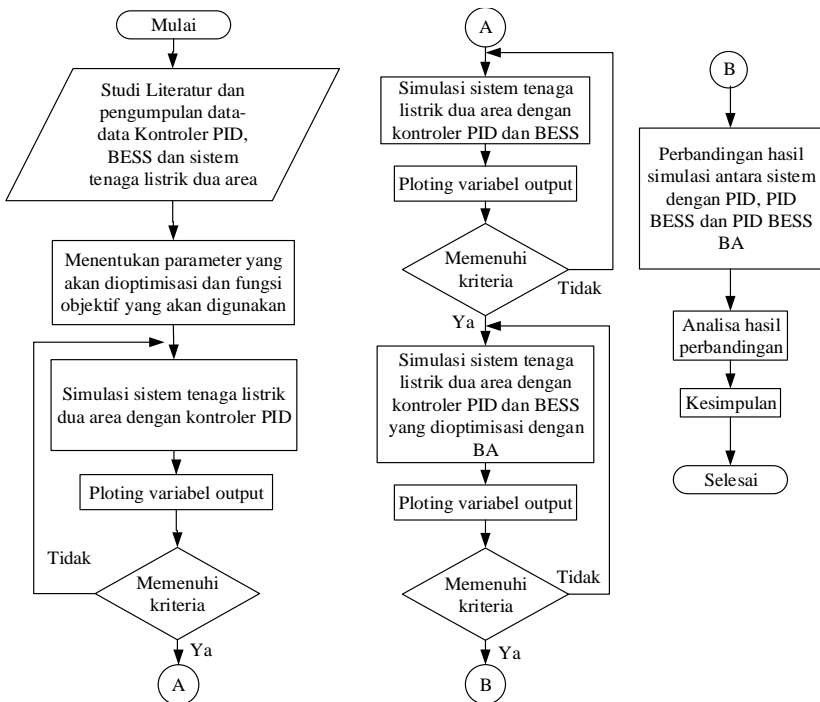
BAB 3

PENALAAN KONTROLER PID DAN BESS MENGUNAKAN BA

Pada Tugas Akhir ini, dilakukan optimisasi pada parameter kontroler PID dan BESS yang dipasang pada sistem tenaga listrik *single* dan dua area. Optimisasi ini dilakukan menggunakan BA. Sistem tenaga listrik *single* dan dua area, kontroler PID, dan BESS disimulasikan dalam *Simulink*, sedangkan program dari BA disimulasikan dalam program *M-File*. Data parameter untuk tugas akhir ini didapatkan dari literatur.

3.1 Algoritma

Flowchart pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut,

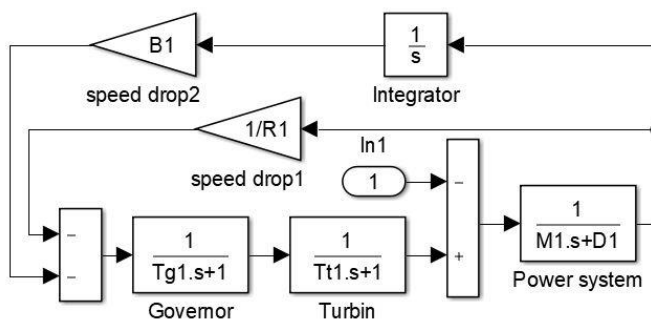


Gambar 3.1 Flowchart penyelesaian Tugas Akhir

Tahapan yang pertama dalam melakukan tugas akhir ini adalah memodelkan sistem tenaga listrik multiarea simulink dengan parameter yang sudah didapatkan dari literatur. Performansi kestabilan sistem diuji terlebih dahulu, setelah sistem stabil, baru dilakukan pemodelan kontroler PID dan BESS. Parameter PID dan BESS ditentukan dengan metode trial error. Setelah itu parameter PID dan BESS yang sudah dipasang dioptimisasi menggunakan BA. *Comprehensive damping index* (CDI) digunakan sebagai fungsi objektif pada BA agar sistem memiliki respon *overshoot* yang rendah dan sistem kembali kekeadaan semula (*settling time*) dalam waktu yang cepat. Simulasi dilakukan beberapa kali untuk mendapatkan hasil yang optimal. Hasil yang didapatkan adalah respon frekuensi dari tiap-tiap area dan daya antar area. Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi sistem yang menggunakan metode konvensional dan hasil simulasi sistem yang parameternya dioptimisasi menggunakan BA.

3.2 Data Sistem Tenaga Listrik Single dan Dua Area

Pada Tugas Akhir ini digunakan data sistem dari model LFC sistem tenaga listrik *single* dan dua area Hadi Saadat. Pada sistem *single* area, *base power* sistem adalah 250 MVA. Sedangkan pada sistem dua area, *base power* sistem adalah 1000 MVA. Model sistem *single* area dapat dilihat pada Gambar 3.2. Parameter sistem ditunjukkan pada Tabel 3.1.



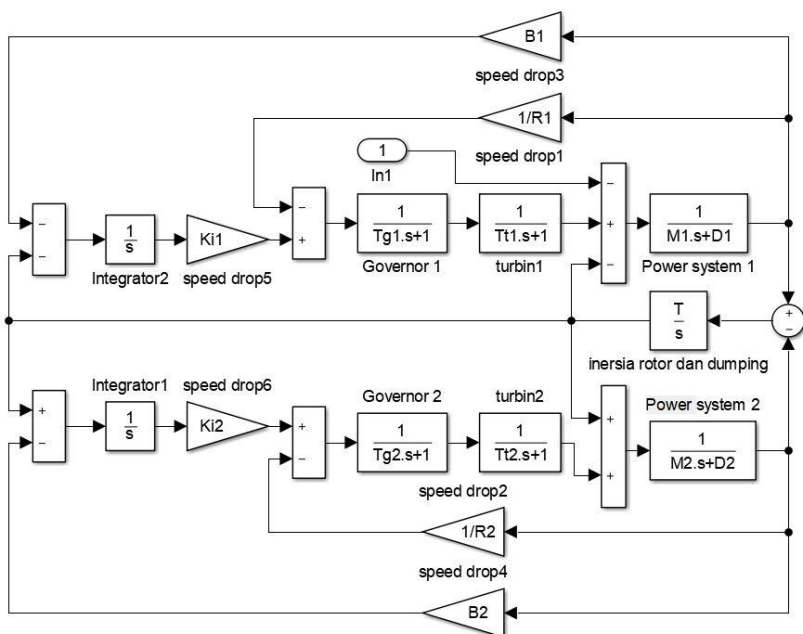
Gambar 3.2 LFC sistem *single* area Hadi Saadat [5]

Tabel 3.1 Parameter sistem *single* area Hadi Saadat [5]

Parameter	Nilai
Speed Drop (R)	0.05
Damping Constant (D)	0.8
Inertia Constant (H)	5
Base Power (MVA)	1000
Governor Time Constant (T_g)	0.2
Turbine Time Constant (T_T)	0.5

Dalam simulasi sistem pada *single* area diberi 2 kasus gangguan yaitu perubahan beban sebesar 0.02 pu dan 0.05 pu. Setelah itu diamati perubahan frekuensi (Δf).

Sedangkan untuk model sistem dua area dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan parameter sistem ditunjukkan pada Tabel 3.2.



Gambar 3.3 LFC sistem dua area Hadi Saadat [5]

Tabel 3.2 Parameter sistem dua area Hadi Saadat [5]

Parameter	Area	
	1	2
Speed Drop (R)	0.05	0.0625
Damping Constant (D)	0.6	0.9
Inertia Constant (H)	5	4
Base Power (MVA)	1000	1000
Governor Time Constant (T_g)	0.2	0.3
Turbine Time Constant (T_t)	0.5	0.6

Dalam simulasi sistem dua area, pada area 1 diberi 2 kasus gangguan yaitu perubahan beban sebesar 0.02 pu dan 0.05 pu. Terjadinya perubahan beban pada area 1 akan mengakibatkan sistem pada area 2 juga terganggu, hal ini dikarenakan semua area saling terinterkoneksi menjadi satu. Setelah itu diamati perubahan frekuensi (Δf) tiap area dan daya antar area (P_{tie}).

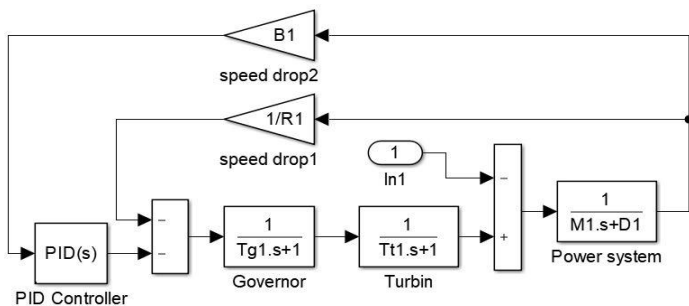
3.3 Penambahan Kontroler PID

Aplikasi kontroler PID pada sistem dilakukan dengan penambahan kontroler PID pada tiap area. Sinyal kontrol dari PID diinputkan ke nilai referensi beban pada unit governor (*set point load governor*). Blok diagram sistem tenaga listrik *single* area dengan kontroler PID dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Untuk mendapatkan osilasi frekuensi yang stabil, maka harus mengatur *gain* kontroler PID. Parameter PID disamakan baik pada *single* maupun dua area. Penjabaran parameter yang digunakan pada tugas akhir ini seperti pada Tabel 3.3.

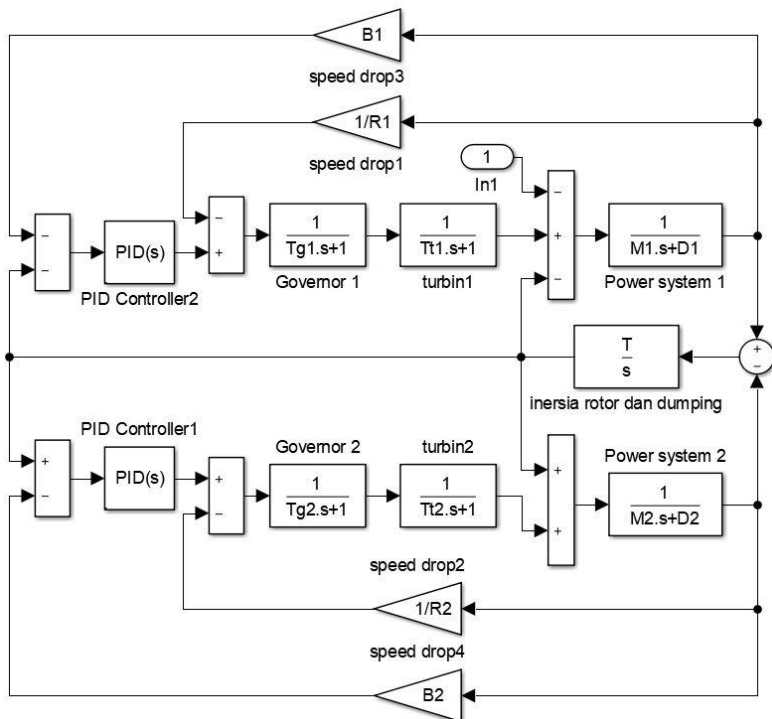
Tabel 3.3 Parameter kontroler PID pada kedua area [27]

<i>Parameter kontroler</i>	K_P	K_I	K_D
Nilai parameter	1	2	1.2



Gambar 3.4 Sistem LFC *single area* dengan kontroler PID

Sedangkan blok diagram untuk sistem tenaga listrik dua area dengan kontroler PID dapat dilihat pada Gambar 3.5.

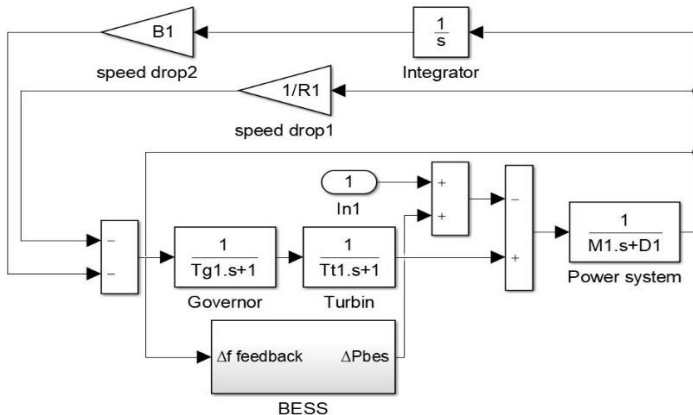


Gambar 3.5 Sistem LFC dua area dengan kontroler PID

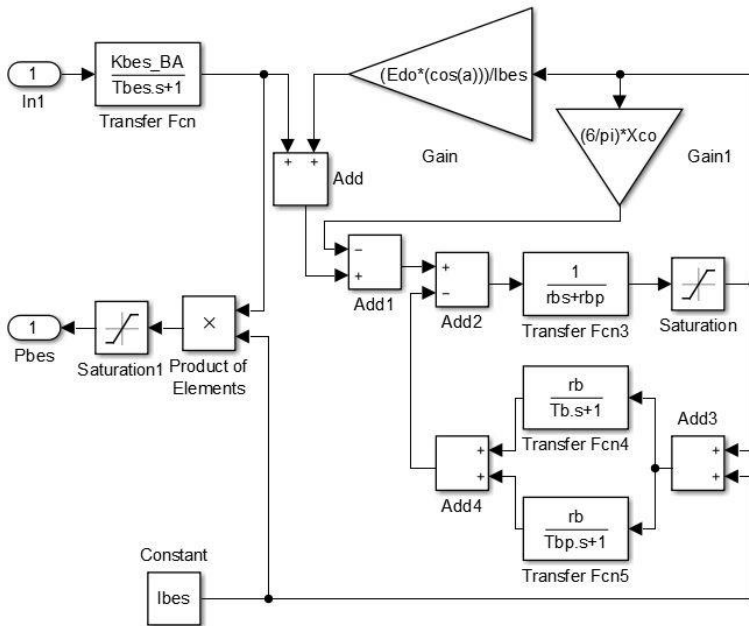
Percobaan dilakukan dengan memasang kontroler PID pada masing-masing area. Dalam simulasi diamati Δf tiap area dan ΔP_{tie} saat terjadi gangguan perubahan beban pada area 1. Kontroler PID digunakan untuk meredam osilasi frekuensi tiap area dan daya antar area.

3.5 Penerapan BESS

Sistem LFC akan ditambah dengan BESS. BESS menjaga sinyal perubahan frekuensi tiap area (Δf) agar bernilai seminimal mungkin, dengan artian lain, nilai *overshoot* sistem akan mengecil. Output dari BESS berupa daya aktif yang diinjeksikan ke sistem. Besar kapasitas BESS yang dipasang pada simulasi ini adalah 10 MW untuk sistem *single* area dan 40 MW untuk sistem dua area. BESS dipasang pada area 1, dimana area 1 merupakan area dengan gangguan perubahan beban terjadi. Sistem *single* dan dua area dengan penambahan BESS dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan 3.5.



Gambar 3.6 Sistem LFC *single* area dengan BESS

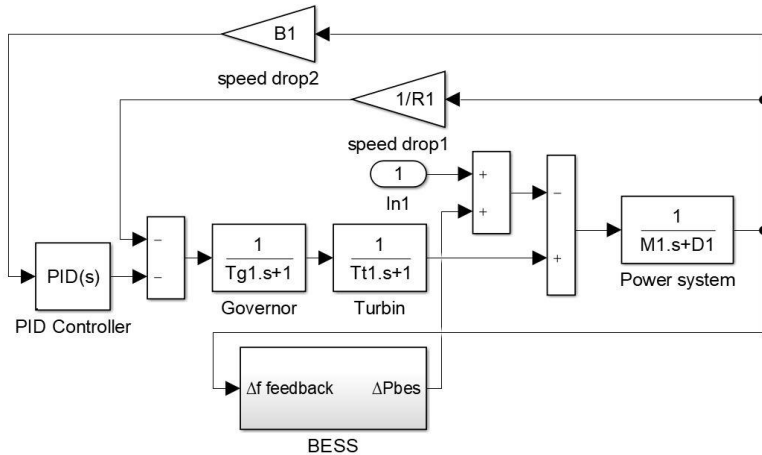


Gambar 3.8 Blok diagram BESS

Setelah BESS dipasang pada sistem, respon sistem diamati. Dimana area 1 dengan area 2 memiliki sistem interkoneksi, sehingga respon area 2 juga perlu untuk diamati. Respon yang diamati yaitu berupa perubahan frekuensi tiap area dan daya antar area. K_{bes} akan bernilai 100 saat setingan awal, namun bisa diubah dan dioptimaskan. Nilai K_{bes} akan dioptimaskan menggunakan BA.

3.6 Penambahan Kontroler PID dan BESS

Sistem LFC dengan kontroler PID lalu ditambahkan dengan BESS. Respon output dari sistem dengan penambahan keduanya diharapkan menjadi lebih baik daripada kedua sistem bekerja sendiri-sendiri. Kontroler PID dipasang pada tiap-tiap area, sedangkan BESS tetap hanya dipasang pada area 1 dimana akan dikondisikan terjadi perubahan beban pada area tersebut.

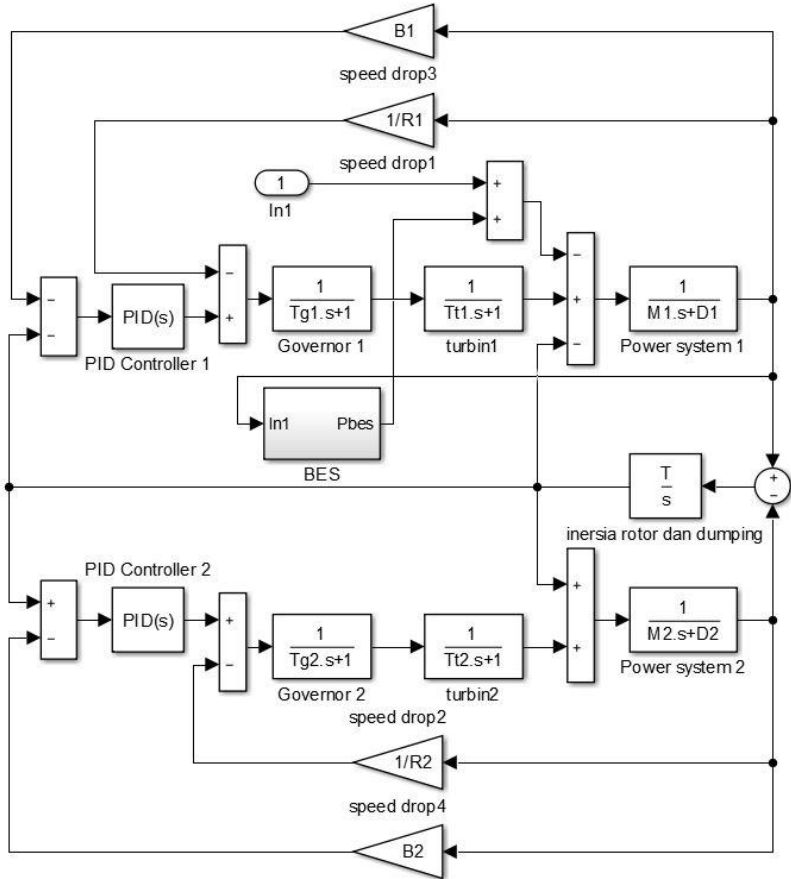


Gambar 3.9 Sistem LFC *single* area dengan kontroler PID dan BESS

Setingan awal keduanya (PID dan BESS) diambil dari penelitian-penelitian sebelumnya. Tabel 3.6 merupakan parameter PID dan BESS yang digunakan dalam tugas akhir ini.

Tabel 3.5 Parameter PID dan BESS pada kedua area

Parameter	Nilai
K_p	1
K_i	2
K_d	1.5
K_{bes}	100



Gambar 3.10 Sistem LFC dua area dengan kontroler PID dan BESS

3.7 Penalaan PID dan BESS menggunakan BA

Dalam pencarian nilai optimal menggunakan BA, maka parameter yang akan dioptimisasi ditentukan terlebih dahulu. Pada tugas akhir ini terdapat empat parameter yang akan dioptimisasi, yaitu K_{bes} , K_p , K_i , dan K_d . Nilai K_{bes} , K_p , K_i , dan K_d diasumsikan sebagai dimensi dalam BA. BA akan mengoptimasi dimensi tersebut hingga iterasi yang telah ditentukan. Kombinasi yang terbaik adalah kombinasi yang menghasilkan sistem

dengan osilasi *overshoot* terkecil dan *settling time* tercepat. Kombinasi dari nilai K_{bess} , K_p , K_i , dan K_d akan mendapatkan kombinasi terbaik. Pada BA fungsi objektif adalah fungsi evaluasi dari masing-masing populasi. Fungsi objektif yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah CDI. Jika penjumlahan menghasilkan nilai yang terkecil, maka respon tersebut dianggap terbaik dengan *overshoot* terkecil dan *settling time* yang tercepat. Persamaan CDI adalah,

$$CDI = \sum_{i=1}^n (1 - \xi_i) \quad (3.1)$$

Semakin kecil nilai CDI berarti nilai *damping* (ξ_i) semakin besar, hal ini berarti sistem memiliki redaman terhadap osilasi semakin tinggi. Dimana redaman osilasi semakin tinggi, hal ini menunjukkan nilai *eigen value* sistem memiliki nilai imajiner yang sangat kecil. Perhitungan nilai *eigen value* dan *damping* pada sistem dilakukan secara otomatis menggunakan program Matlab.

Parameter BA yang digunakan dalam metode optimisasi ini secara lengkap ditunjukkan dalam Tabel 3.8.

Tabel 3.6 Data parameter BA

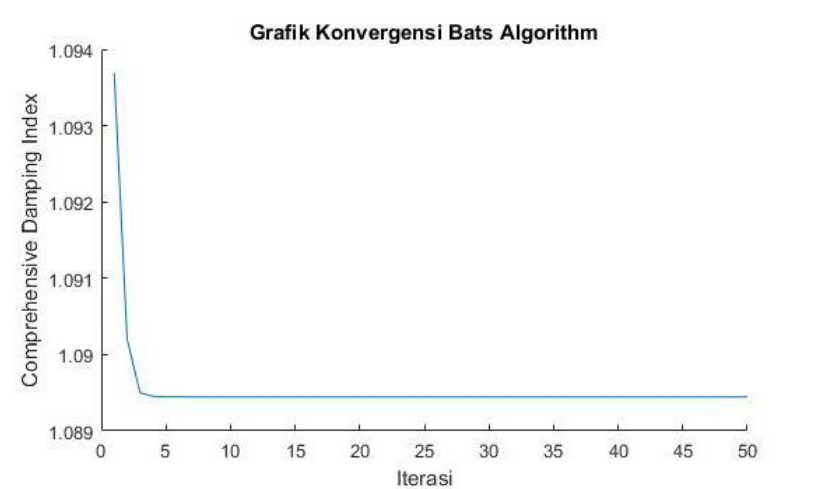
Parameter BA	Nilai
Ukuran populasi	40
Kebisingan	0,15
Rasio pulsa	0,45
Alpha = Gamma	0,7
Frekuensi minimum	0
Frekuensi maksimum	100
Jumlah iterasi	50

Simulasi yang dihasilkan yaitu membandingkan sistem LFC *uncontrolled*, sistem LFC dengan PID, sistem LFC dengan BESS, sistem LFC dengan PID+BESS, dan sistem LFC dengan PID+BESS yang ditala menggunakan BA. Respon yang diamati yaitu berupa Δf tiap area dan P_{tie} pada saat terjadi perubahan beban pada area 1. Dari hasil respon tersebut penggunaan metode optimisasi PID dan BESS dengan menggunakan BA berfungsi untuk memperbaiki nilai *overshoot* dan *settling time*. Hasil simulasi optimisasi parameter PID dan BESS menggunakan BA pada sistem *single area* ditunjukkan oleh Tabel 3.9, dan Gambar 3.11

merupakan grafik konvergensi yang didapat dari hasil simulasi penalaan parameter PID dan BESS dengan menggunakan BA pada sistem *single area*. Sedangkan untuk sistem dua area, hasil simulasi optimasi parameter PID BESS menggunakan BA ditunjukkan oleh Tabel 3.10, dan grafik konvergensi yang didapat ditunjukkan pada Gambar 3.12.

Tabel 3.7 Hasil optimasi parameter pid dan bess menggunakan ba pada *single area*

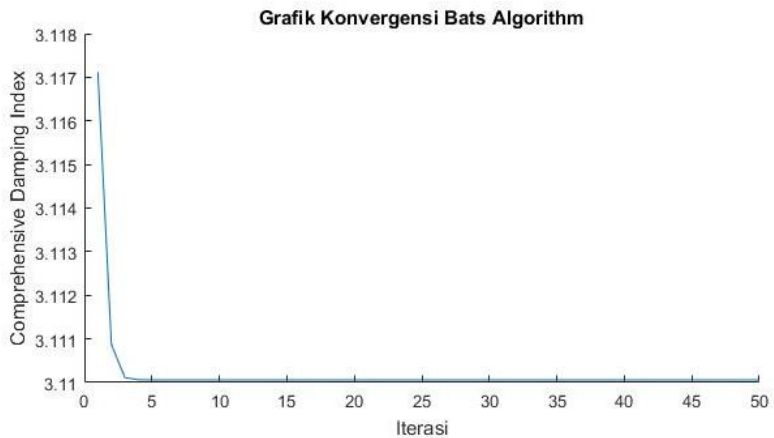
<i>Parameter kontroler</i>	K_P	K_I	K_D	K_{BESS}
Nilai parameter	8.1529	6.743	4.561	100.0057



Gambar 3.11 Grafik konvergensi ba pada optimasi parameter sistem *single area*

Tabel 3.8 Hasil optimasi parameter pid dan bess menggunakan ba pada dua area

<i>Parameter kontroler</i>	K_P	K_I	K_D	K_{BESS}
Nilai parameter	5.4049	2.4232	4.0804	104.687



Gambar 3.12 Grafik konvergensi ba pada optimasi parameter sistem dua area

Simulasi dilakukan dengan 50 kali iterasi. Dari gambar konvergensi dapat dilihat bahwa fungsi obyektif mencapai nilai terbaik pada iterasi ke 4 pada sistem *single* area dan pada iterasi ke 5 pada sistem dua area. Fungsi objektif terbaik menunjukkan bahwa keelawar telah menemukan lokasi terbaik (solusi terbaik). Lokasi terbaik menunjukkan bahwa koordinasi parameter PID dan BESS telah optimal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Tujuan dari simulasi pada tugas akhir ini adalah mendapat perbandingan dari respon output berbagai skenario sistem. Respon output yang dibandingkan adalah nilai *overshoot* dan *settling time* perubahan frekuensi (Δf) pada tiap-tiap area, apabila pada sistem dua area, berarti terdapat tambahan satu lagi respon output yang dianalisis, yaitu *tie line*. Simulasi dilakukan dengan menala parameter kontroler PID dan BESS menggunakan BA. Hasil dari penalaan menggunakan BA akan dibandingkan dengan penalaan tanpa menggunakan BA. Penalaan tanpa menggunakan BA dilakukan dengan merujuk pada penelitian sebelumnya.

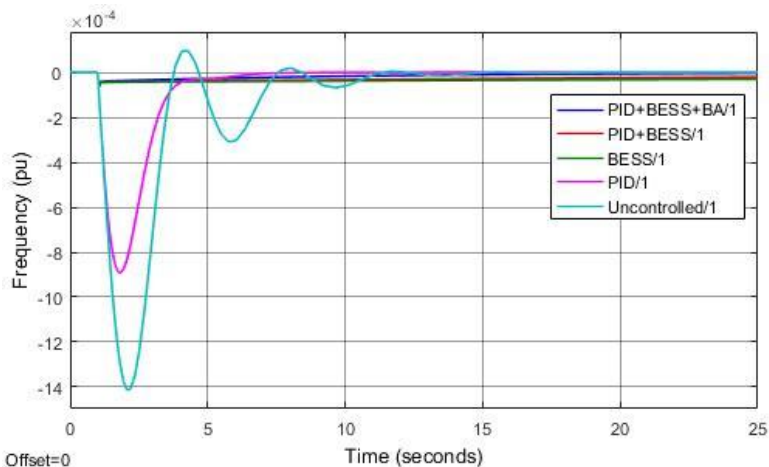
Adapun skenario kondisi yang diberikan adalah dengan memberikan gangguan berupa step input pada area 1, apabila sistem *single* area berarti gangguan terjadi di area itu sendiri. Besar gangguan yang diberikan terdiri dari 2 macam, yaitu 0.02 pu dan 0.05 pu. Terdapat lima skenario dalam tiap-tiap sistem, yaitu sistem *uncontrolled*, sistem dengan kontroler PID, sistem dengan BESS, sistem dengan kontroler PID dan BESS, dan sistem dengan kontroler PID dan BESS yang dioptimisasi dengan BA. Pada simulasi ini, hasil dari respon output sistem dikatakan kembali ke kondisi *steady state* apabila deviasi frekuensi berada pada nilai 2-5% dari puncak *overshoot* [28].

4.1 Respon Δf Sistem *Single* Area

Besar daya baterai yang diberikan (untuk skenario sistem dengan tambahan BESS) adalah 10 MW, sedangkan *base power* adalah 250 MW, maka BESS hanya bisa bekerja efektif ketika sistem mengalami perubahan daya maksimal sebesar 0.04 pu. Perubahan daya 0.04 pu berarti daya beban mengalami kenaikan secara tiba-tiba sebesar 10 MW. Walaupun pada kenyataannya perubahan beban sebesar itu jarang terjadi, namun hal tersebut tetap disimulasikan dengan tujuan untuk meninjau respon sistem apabila gangguan diatas daya BESS.

4.1.1 Respon Δf sistem *single* area dengan $\Delta P_L=0.02$ pu

Ketika sistem diberi gangguan step input sebesar 0.02 pu, sistem akan memberikan respon seperti grafik pada gambar 4.1. Tabel 4.1 menunjukkan data respon sistem terhadap gangguan.



Gambar 4.1 Respon sistem *single* area terhadap perubahan beban 0,02 pu

Tabel 4.1 Data respon sistem *single* area terhadap perubahan beban 0,02 pu

Metode Kontrol	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Settling time</i> (detik)
LFC	-0.00141300	9.673
LFC+PID	-0.00089390	4.035
LFC+BESS	-0.00006156	174.7
LFC+PID+BESS	-0.00006137	88.42
LFC+PID+BESS+BA	-0.00006081	28.18

Penambahan control PID berfungsi untuk merangsang governor untuk mempercepat kenaikan frekuensi. Namun respon governor terbatas, oleh sebab itu dibutuhkan suntikan daya dari sumber lain. Dalam hal ini masalah yang ingin diatasi adalah frekuensi, maka daya yang diberikan haruslah daya aktif. Penambahan BESS pada sistem akan menghasilkan nilai *overshoot* yang jauh lebih baik lagi. Nilai *settling time* memang terlihat lebih lama daripada sistem yang tidak memakai BESS. Namun apabila diperhatikan lagi, bahkan nilai *overshoot* dari sistem dengan BESS, memiliki nilai 0.05 kali dari overshoot sistem yang tidak

menggunakan BESS. Nilai tersebut jauh lebih kecil, seakan-akan tampak seperti tidak terjadi gangguan pada sistem tersebut. Perbandingan nilai *overshoot* tiap-tiap skenario dipaparkan dalam table 4.2 berikut,

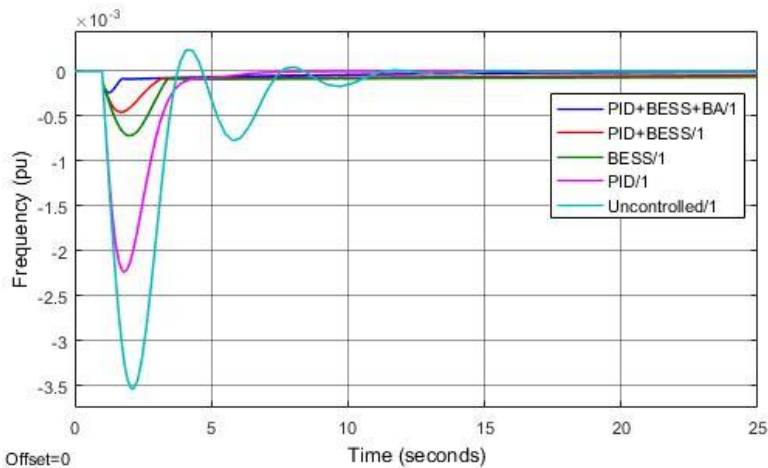
Tabel 4.2 Perbandingan nilai *overshoot* pada masing-masing skenario

	LFC	LFC + PID	LFC + BESS	LFC + PID + BESS	LFC + PID + BESS with BA
Δf (Hz)	0.07065	0.044695	0.003078	0.003068	0.00304
	100%	63.26%	4.3567%	4.3425%	4.3036%

Kontroler PID BESS yang dioptimisasi dengan BA menghasilkan nilai *overshoot* dan *settling time* terbaik apabila dibandingkan dengan semua skenario kondisi dimana terdapat BESS yang terpasang didalam sistem. Hal ini membuktikan bahwa BA mampu menghasilkan nilai optimal dari koordinasi kontroler PID dan BESS.

4.1.3 Respon Δf sistem *single area* dengan $\Delta P_L=0.05$ pu

Ketika sistem diberi gangguan step input sebesar 0.05 pu, sistem akan memberikan respon seperti grafik pada gambar 4.3. Tabel 4.3 menunjukan data respon sistem terhadap gangguan.



Gambar 4.2 Respon sistem *single area* terhadap $\Delta P_L=0,05$ pu

Tabel 4.3 Data respon sistem *single area* terhadap $\Delta P_L=0,05$ pu

Metode Kontrol	Overshoot (pu)	Settling time (detik)
LFC	-0.0035360	9.72
LFC+PID	-0.0022340	4.05
LFC+BESS	-0.0007174	66.98
LFC+PID+BESS	-0.0004555	48.23
LFC+PID+BESS+BA	-0.0002392	22.71

Dengan gangguan step input sebesar 0.05 pu, yang mana hal itu merupakan gangguan dengan ΔP_L yang lebih besar dari kapasitas BESS, sistem dengan tambahan BESS masih bisa memberikan nilai *overshoot* yang lebih kecil. Meski dengan waktu *settling time* yang lebih lama, besar defiasi frekuensi jauh lebih kecil sehingga bisa dianggap tidak mengganggu kestabilan sistem. Perbandingan nilai *overshoot* tiap-tiap skenario dipaparkan dalam table 4.2 berikut,

Tabel 4.4 Perbandingan nilai *overshoot* pada masing-masing skenario

	LFC	LFC + PID	LFC + BESS	LFC + PID + BESS	LFC + PID + BESS with BA
Δf (Hz)	0.1768	0.1117	0.03587	0.022775	0.01196
	100%	63.179%	20.288%	12.882%	6.7647%

Respon sistem yang menggunakan BESS bisa dipercepat menggunakan kontroler PID. Hasilnya adalah respon sistem dengan PID BESS menghasilkan *overshoot* lebih kecil dari sistem yang hanya menggunakan PID dan BESS saja yang bekerja sendiri-sendiri. Sedangkan respon deviasi frekuensi sistem dengan koordinasi PID BESS yang dioptimasi menggunakan BA memiliki *settling time* lebih cepat dari yang tidak menggunakan BA. Hal ini membuktikan bahwa BA mampu menghasilkan nilai optimal dari koordinasi kontroler PID dan BESS.

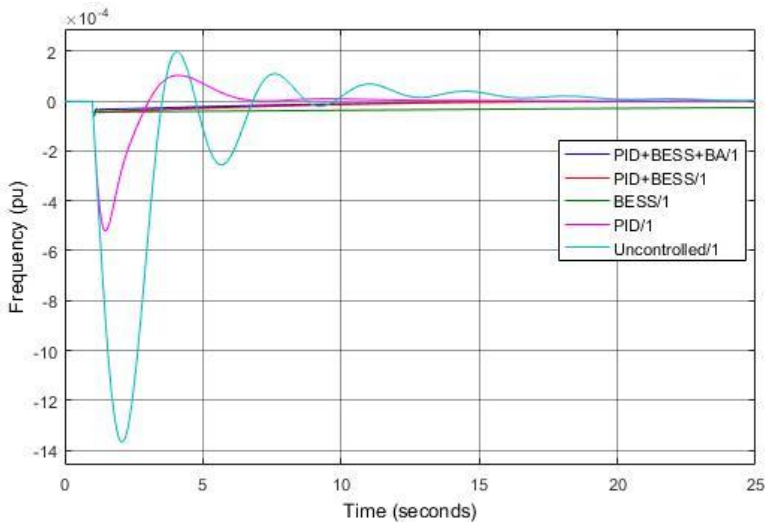
4.2 Respon Sistem Dua Area

Sistem dua area diberikan gangguan step input sebesar 0.02 pu dan 0.05 pu. Dengan besar daya baterai yang diberikan (untuk skenario sistem dengan tambahan BESS) adalah 100 MW, sedangkan *base power* adalah

1000 MW, maka BESS hanya bisa bekerja efektif ketika sistem mengalami perubahan daya maksimal sebesar 0.1 pu. Perubahan daya 0.1 pu berarti daya beban mengalami kenaikan secara tiba-tiba sebesar 100 MW. Walaupun pada kenyataannya perubahan beban sebesar itu sangat jarang terjadi, namun hal tersebut tetap disimulasikan dengan tujuan untuk meninjau respon sistem apabila gangguan diatas daya BESS.

4.2.1 Respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0.02$ pu

Ketika sistem diberi gangguan step input sebesar 0.02 pu, sistem pada area 1 (area dimana terjadi gangguan) akan memberikan respon seperti grafik pada gambar 4.4. Tabel 4.4 menunjukkan data respon sistem pada area 1 terhadap gangguan.



Gambar 4.3 Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,02 pu pada area 1

Tabel 4.5 Data respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,02 pu pada area 1

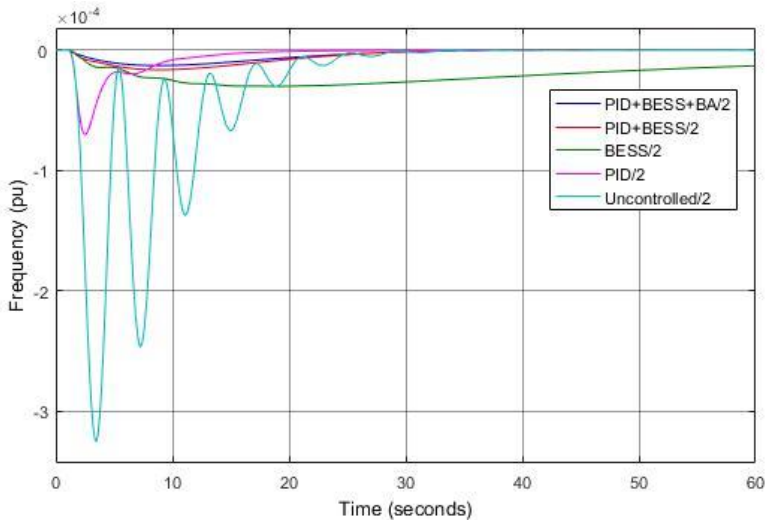
Metode Kontrol	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Settling time</i> (detik)
LFC	-0.00137100	11.14
LFC+PID	-0.00052140	5.862
LFC+BESS	-0.00006154	106.3
LFC+PID+BESS	-0.00006090	16.09
LFC+PID+BESS+BA	-0.00005792	15.89

Pada sistem tenaga dua area, respon deviasi frekuensi terlihat sama dengan respon dari sistem tenaga *single* area. Dimana sistem yang menggunakan penambahan kontroler menghasilkan respon yang lebih baik. BESS sendiri juga memberikan hasil yang sangat signifikan pada sistem dua area. Nilai *settling time* memang terlihat lebih lama daripada sistem yang tidak memakai BESS. Namun apabila diperhatikan lagi, bahkan nilai *overshoot* dari sistem dengan BESS, memiliki nilai sekitar 0.05 kali dari overshoot sistem yang tidak menggunakan BESS. Nilai tersebut jauh lebih kecil, seakan-akan tampak seperti tidak terjadi gangguan pada sistem tersebut. Perbandingan nilai *overshoot* tiap-tiap skenario dipaparkan dalam table 4.2 berikut,

Tabel 4.6 Perbandingan nilai *overshoot* pada masing-masing skenario

	LFC	LFC + PID	LFC + BESS	LFC + PID + BESS	LFC + PID + BESS with BA
Δf_i (Hz)	0.06855	0.02607	0.003077	0.003045	0.002896
	100%	38.03%	4.4887%	4.442%	4.2247%

Respon deviasi frekuensi pada area 2 (area yang tidak mengalami gangguan) dapat dilihat seperti grafik pada gambar 4.5. Tabel 4.5 menunjukkan data respon sistem pada area 2 terhadap gangguan.



Gambar 4.4 Respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0,02$ pu pada area 2

Tabel 4.7 Data respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0,02$ pu pada area 2

Metode Kontrol	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Settling time</i> (detik)
LFC	-0.00032530	20.07
LFC+PID	-0.00007004	14.24
LFC+BESS	-0.00003008	141.1
LFC+PID+BESS	-0.00001628	31.45
LFC+PID+BESS+BA	-0.00001278	33.63

Tentu dampak perubahan beban pada area 1 terhadap area 2 akan terasa lebih kecil daripada yang dirasakan oleh area 1 itu sendiri. Saat perubahan beban 0.02 pu terjadi pada area 1, area 2 tidak merasakan dampak yang berarti terhadap sistem.

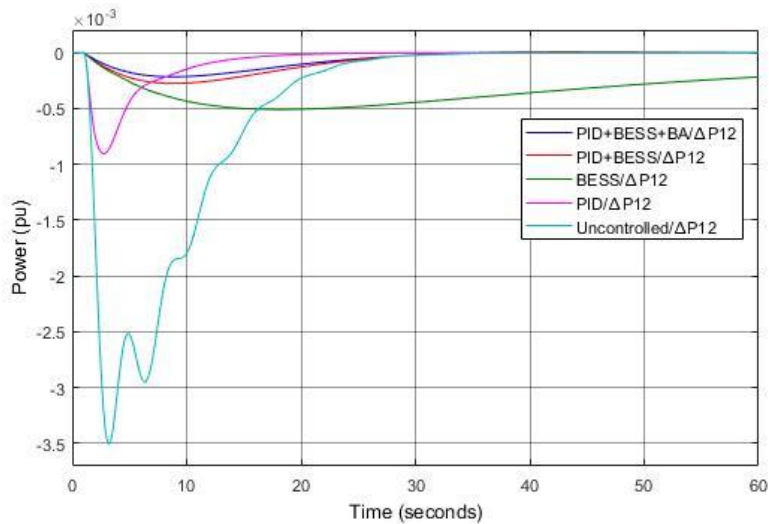
Sistem dengan tambahan BESS pada area 1 bisa dikatakan sama sekali tidak memberikan efek terhadap area 2 dari adanya gangguan yang terjadi pada area 1. Area 2 hanya terjadi *overshoot* yang bernilai sangat kecil, yaitu 0.00003 pu atau 0.0015 Hz. Nilai *settling time* memang terlihat lebih lama daripada sistem yang tidak memakai BESS. Namun

apabila diperhatikan lagi, bahkan nilai *overshoot* dari sistem dengan BESS, memiliki nilai sekitar 0.1 kali dari *overshoot* sistem yang tidak menggunakan BESS. Nilai tersebut jauh lebih kecil, seakan-akan tampak seperti tidak terjadi gangguan pada sistem tersebut. Perbandingan nilai *overshoot* tiap-tiap skenario dipaparkan dalam table 4.2 berikut,

Tabel 4.8 Perbandingan nilai *overshoot* pada masing-masing skenario

	LFC	LFC + PID	LFC + BESS	LFC + PID + BESS	LFC + PID + BESS with BA
Δf_2 (Hz)	0.016265	0.003502	0.001504	0.000814	0.000639
	100%	21.53%	9.2468%	5.0046%	3.9287%

Respon perubahan daya beban pada *tie line* (interkoneksi antara area 1 dengan area 2) dapat dilihat seperti grafik pada gambar 4.6. Tabel 4.6 menunjukkan data respon sistem pada area 2 terhadap gangguan.



Gambar 4.5 Respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0,02$ pu pada *tie line*

Tabel 4.9 Data respon sistem dua area terhadap $\Delta P_L=0,02$ pu pada *tie line*

Metode Kontrol	Overshoot (pu)	Settling time (detik)
LFC	-0.0035070	21.66
LFC+PID	-0.0009057	15.37
LFC+BESS	-0.0005095	141.1
LFC+PID+BESS	-0.0002759	31.49
LFC+PID+BESS+BA	-0.0002167	33.58

Tie line merupakan interkoneksi antar kedua area, dimana terjadi transfer daya dari salah satu area menuju area yang lain. Grafik pada gambar 4.5 menampilkan besar nilai transfer daya yang terjadi pada kedua area. Nilai minus berarti transfer daya terjadi dari area 2 menuju area 1, dimana memang area 1 mengalami penambahan daya beban sehingga area 2 akan menopang kebutuhan daya pada area 1.

Pada *tie line* dengan gangguan $\Delta P_L=0.02$ pu respon perubahan daya beban pada sistem dengan tambahan BESS terlihat sangat lambat untuk kembali ke kondisi *steady state*, walaupun nilai *overshoot* yang dihasilkan masih lebih rendah daripada sistem yang tanpa tambahan BESS. Untuk mengatasi waktu *settling time* yang terlalu lama tersebut, kontrol tambahan sangat dianjurkan untuk dikoordinasikan dengan BESS itu sendiri. Koordinasi kontrol tambahan (PID) dan BESS akan mencapai nilai optimal dengan bantuan optimasi menggunakan BA. Perbandingan nilai *overshoot* tiap-tiap skenario dipaparkan dalam table 4.2 berikut,

Tabel 4.10 Perbandingan nilai *overshoot* pada masing-masing skenario

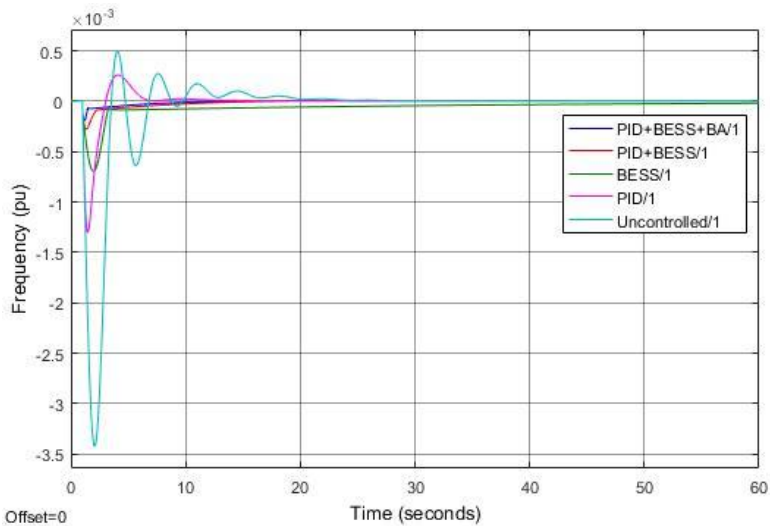
	LFC	LFC + PID	LFC + BESS	LFC + PID + BESS	LFC + PID + BESS with BA
ΔP_{12} (pu)	0.00351	0.00091	0.00051	0.00028	0.00022
	100%	25.83%	14.53%	7.867%	6.179%

Transfer daya pada *tie line* ini membahas tentang berapa besar daya yang ditransfer oleh sistem yang tidak terkena gangguan kepada sistem yang terkena gangguan. Jadi, mau sebesar apapun nilai *overshoot*

yang dihasilkan, tidak akan terjadi masalah selama nilai frekuensi pada masing-masing area masih terdapat pada rentang aman.

4.2.3 Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0.05 pu

Ketika sistem diberi gangguan step input sebesar 0.05 pu, sistem pada area 1 akan memberikan respon seperti grafik pada gambar 4.7. Tabel 4.7 menunjukkan data respon sistem pada area 1 terhadap gangguan.



Gambar 4.6 Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 1

Tabel 4.11 Data respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 1

Metode Kontrol	Overshoot (pu)	Settling time (detik)
LFC	-0.0034250	11.09
LFC+PID	-0.0013030	5.866
LFC+BESS	-0.0006951	39.99
LFC+PID+BESS	-0.0002775	12.85
LFC+PID+BESS+BA	-0.0001719	15.12

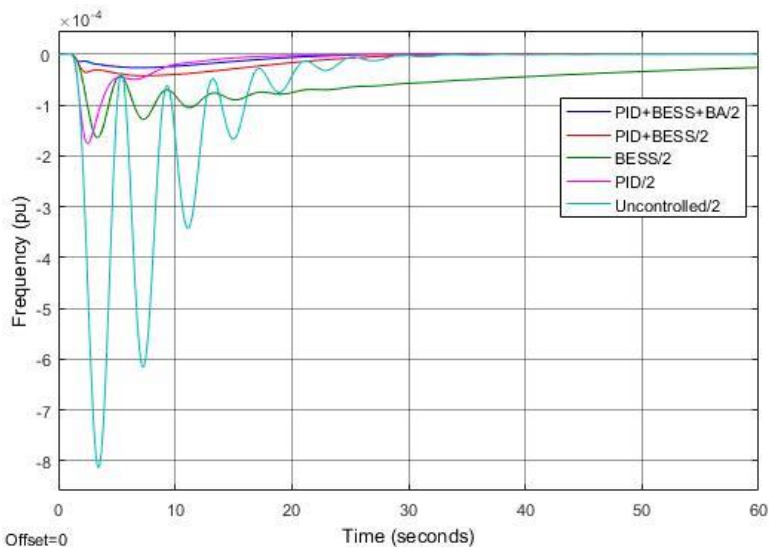
Dengan gangguan step input sebesar 0.05 pu, yang mana hal itu merupakan gangguan dengan ΔP_L yang lebih besar dari kapasitas BESS, sistem dengan tambahan BESS masih bisa memberikan nilai *overshoot* yang lebih kecil. Meski dengan waktu *settling time* yang lebih lama, besar defiasi frekuensi jauh lebih kecil sehingga bisa dianggap tidak mengganggu kestabilan sistem. Perbandingan nilai *overshoot* tiap-tiap skenario dipaparkan dalam table 4.2 berikut,

Tabel 4.12 Perbandingan nilai *overshoot* pada masing-masing skenario

	LFC	LFC + PID	LFC + BESS	LFC + PID + BESS	LFC + PID + BESS with BA
Δf_i (Hz)	0.1713	0.0652	0.0348	0.0139	0.0086
	100%	38.04%	20.3%	8.1%	5.019%

Respon sistem yang menggunakan BESS bisa dipercepat menggunakan kontroler PID. Sedangkan respon deviasi frekuensi sistem dengan koordinasi PID BESS yang dioptimasi menggunakan BA memiliki *settling time* lebih cepat dari yang tidak menggunakan BA. Hal ini membuktikan bahwa BA mampu menghasilkan nilai optimal dari koordinasi kontroler PID dan BESS.

Respon deviasi frekuensi pada area 2 (area yang tidak mengalami gangguan) dengan perubahan beban sebesar 0.1 pu, dapat dilihat seperti grafik pada gambar 4.6. Tabel 4.5 menunjukkan data respon sistem pada area 2 terhadap gangguan.



Gambar 4.7 Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 2

Tabel 4.13 Data respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada area 2

Metode Kontrol	<i>Overshoot (pu)</i>	<i>Settling time (detik)</i>
LFC	-0.00081350	20.07
LFC+PID	-0.00017560	14.21
LFC+BESS	-0.00016420	103.3
LFC+PID+BESS	-0.00004212	30.04
LFC+PID+BESS+BA	-0.00003197	33.48

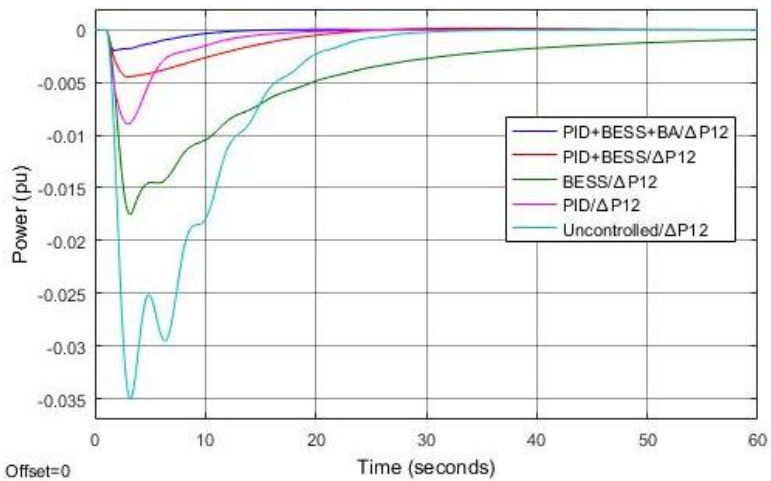
Saat perubahan beban 0.05 pu terjadi pada area 1, area 2 tidak merasakan dampak yang berarti terhadap sistem. Sistem dengan tambahan BESS pada area 1 bisa dikatakan sama sekali tidak memberikan efek terhadap area 2 dari adanya gangguan yang terjadi pada area 1. Area 2 hanya terjadi *overshoot* yang bernilai sangat kecil, yaitu 0.000164 pu atau 0.0082 Hz. Nilai *settling time* memang terlihat lebih lama daripada sistem yang tidak memakai BESS. Namun apabila diperhatikan lagi,

bahkan nilai *overshoot* dari sistem dengan BESS, memiliki nilai sekitar 0.2 kali dari *overshoot* sistem yang tidak menggunakan BESS. Nilai tersebut jauh lebih kecil, seakan-akan tampak seperti tidak terjadi gangguan pada sistem tersebut. Perbandingan nilai *overshoot* tiap-tiap skenario dipaparkan dalam table 4.2 berikut,

Tabel 4.14 Perbandingan nilai *overshoot* pada masing-masing skenario

	LFC	LFC + PID	LFC + BESS	LFC + PID + BESS	LFC + PID + BESS with BA
Δf_2 (Hz)	0.0407	0.0088	0.0082	0.0021	0.0016
	100%	21.58%	20.18%	5.1776%	3.9299%

Respon perubahan daya pada *tie line* (interkoneksi antara area 1 dengan area 2) dapat dilihat seperti grafik pada gambar 4.7. Tabel 4.6 menunjukkan data respon sistem pada area 2 terhadap gangguan.



Gambar 4.8 Respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada *tie line*

Tabel 4.15 Data respon sistem dua area terhadap perubahan beban 0,05 pu pada *tie line*

Metode Kontrol	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Settling time</i> (detik)
LFC	-0.0087640	21.68
LFC+PID	-0.0022640	15.37
LFC+BESS	-0.0017620	120.20
LFC+PID+BESS	-0.0007097	30.20
LFC+PID+BESS+BA	-0.0005420	33.39

Pada *tie line* dengan gangguan $\Delta P_L=0.05$ pu respon perubahan daya beban pada sistem dengan tambahan BESS terlihat sangat lambat untuk kembali ke kondisi *steady state*, walaupun nilai *overshoot* yang dihasilkan masih lebih rendah daripada sistem yang tanpa tambahan BESS. Untuk mengatasi waktu *settling time* yang terlalu lama tersebut, kontrol tambahan sangat dianjurkan untuk dikoordinasikan dengan BESS itu sendiri. Koordinasi kontrol tambahan (PID) dan BESS akan mencapai nilai optimal dengan bantuan optimasi menggunakan BA. Perbandingan nilai *overshoot* tiap-tiap skenario dipaparkan dalam table 4.2 berikut,

Tabel 4.16 Perbandingan nilai *overshoot* pada masing-masing skenario

	LFC	LFC + PID	LFC + BESS	LFC + PID + BESS	LFC + PID + BESS with BA
ΔP_{l2} (pu)	0.4382	0.1132	0.0881	0.0355	0.0271
	100%	25.83%	20.1%	8.098%	6.184%

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut,

1. Penambahan kontroler PID pada LFC dapat menurunkan nilai *overshoot* dan mempercepat waktu *settling time* dari respon sistem akibat adanya gangguan.
2. Penambahan BESS pada LFC dapat menurunkan nilai *overshoot* dari respon sistem akibat adanya gangguan. Meski waktu *settling time* terlihat lebih lama, namun nilai deviasi yang terjadi sangat kecil, kurang dari 5% dari nilai *overshoot* sistem LFC.
3. Koordinasi dari kontroller PID dan BESS memberikan hasil yang lebih baik lagi daripada keduanya bekerja sendiri-sendiri.
4. BA dapat mengoptimalkan koordinasi PID dan BESS, sehingga memperkecil nilai *overshoot* dan mempercepat nilai *settling time*.

5.1 Saran

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah,

1. Pemodelan BESS dapat digunakan untuk sistem yang lebih besar daripada LFC sistem tenaga listrik dua area.
2. Penalaan parameter kontroler PID dan BESS dapat dilakukan menggunakan komputasi cerdas yang lain dan hasilnya bisa dibandingkan dengan penelitian ini.
3. Pemodelan BESS bisa dikembangkan menjadi lebih akurat lagi melalui penelitian lebih lanjut.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Robandi, *Modern Power System Control*. Yogyakarta: Penerbit ANDI, 2009.
- [2] P. Prajapati and A. Parmar, "Multi-area Load Frequency Control by various conventional controller using Battery Energy Storage System," *2016 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2016*, pp. 467–472, 2016.
- [3] I. Robandi, *Desain Sistem Tenaga Modern*. Yogyakarta: Penerbit ANDI, 2006.
- [4] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1993.
- [5] H. Saadat, *Power System Analysis*. WBC/McGraw-Hill, 1999.
- [6] D. Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [7] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals 4e*, 4th ed. McGraw-Hill Companies, 2005.
- [8] S. Kalyani, S. Nagalakshmi, and R. Marisha., "Load frequency control using battery energy storage system in interconnected power system," in *Computing Communication & Networking Technologies (ICCCNT), 2012 Third International Conference on*, 2012, pp. 1–6.
- [9] H.-. Kunisch, K. G. Kramer, and H. Dominik, "Battery Energy Storage Another Option for Load-Frequency-Control and Instantaneous Reserve," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. EC-1, no. 3, pp. 41–46, 1986.
- [10] L. H. Walker, "10-MW GTO converter for battery peaking service," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 26, no. 1, pp. 63–72, 1990.
- [11] P. Brown, "Mitsubishi Installs 50MW Energy Storage System to Japanese Power Company," 2016. [Online]. Available: <https://electronics360.globalspec.com/article/6402/mitsubishi-installs-50mw-energy-storage-system-to-japanese-power-company>. [Accessed: 05-Nov-2018].
- [12] G. Parkinson, "Tesla big battery goes the full discharge – 100MW – for first time," 2017. [Online]. Available: <https://reneweconomy.com.au/tesla-big-battery-goes-full-discharge-100mw-first-time-37826/>. [Accessed: 05-Nov-2018].
- [13] M. Froese, "Vistra Energy to develop 300-MW battery storage

- project in California,” 2018. [Online]. Available: www.energystoragenetworks.com/vistra-energy-to-develop-300-mw-battery-storage-project-in-california. [Accessed: 05-Nov-2018].
- [14] C.-C. Liu, “Effect of BESS on LFC Considering Governor Deadband and Generation Rate Constraint,” vol. 10, no. 3, pp. 555–561, 1995.
 - [15] T. Kerdphol, K. Fuji, Y. Mitani, M. Watanabe, and Y. Qudaih, “Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 81, pp. 32–39, 2016.
 - [16] C.-F. Lu, C.-C. Liu, and C.-J. Wu, “Effect of battery energy storage system on load frequency control considering governor deadband and generation rate constraint,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 3, pp. 555–561, 1995.
 - [17] M. D. Anderson and D. S. Carr, “Battery energy storage technologies,” *Proc. IEEE*, vol. 81, no. 3, pp. 475–479, 1993.
 - [18] A. Stock, P. Stock, and V. Sahajwalla, *Powerful Potential : Battery Storage For Renewable Energy And Electric Cars*. Climate Council, 2015.
 - [19] K. Bullis, “Old Battery Type Gets an Energy Boost, MIT Energy Review,” 2015. [Online]. Available: <https://www.technologyreview.com/s/535251/oldbattery-%0Atype-gets-an-energy-boost/>. [Accessed: 06-Jun-2016].
 - [20] R. Ruegg and P. Thomas, *Linkages of DOE’s Energy Storage R&D to Batteries and Ultracapacitors for Hybrid, Plug- In Hybrid, and Electric Vehicles*. U.S. Department of Energy, 2008.
 - [21] S. Shibasaki, M. Toge, and S. Iwamoto, “Load frequency control using a NAS battery system controlled by a Kaiman filter,” in *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 2012, pp. 236–241.
 - [22] T. Sasaki, T. Kadoya, and K. Enomoto, “Study on load frequency control using redox flow batteries,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 660–667, 2004.
 - [23] M. Ashari, *Desain Konverter Elektronika Daya*. Bandung: Informatika Bandung, 2017.
 - [24] X. Yang, “A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm,” *Nature-Inspired Coop. Strateg. Optim. (NISCO 2010)*, no. April

- 2010, pp. 65–74, 2010.
- [25] Suharto, “Penalaan Power System Stabilizer (PSS) untuk Perbaikan Stabilitas Dinamik Pada Sistem Tenaga Listrik menggunakan Bat Algorithm (BA),” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
 - [26] M. Pujiantara and M. Abdillah, *Adaptive PI Controller Berbasis Bat Algorithm (BA) dan Extreme Learning Machine (ELM) Untuk Kontrol Kecepatan Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)*, vol. 9. 2011.
 - [27] Miftakhur Roziq, “Koordinasi Optimal Kontroler PID dan Capacitive Energy Storage (SEC) untuk Load Frequency Control (LFC) menggunakan Ant Colony Optimization,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2011.
 - [28] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 2002.

Halaman ini sengaja dikosongkan

NOMENKLATUR

LFC	<i>Load frequency control</i>
PID	<i>Proportional integral differential</i>
BESS	<i>Battery energy storage system</i>
BA	<i>Bat algorithm</i>
CDI	<i>Comprehensive damping index</i>
ACE	<i>Area Control Error</i>
AI	<i>Artificial Intelligent</i>
G	<i>Generator</i>
ΔP_V	<i>Power deviation of governor</i>
ΔP_{tie}	<i>Power deviation of tie line</i>
ΔP_C	<i>Respon deviation of LFC</i>
ΔP_G	<i>Active power deviation of output Generator</i>
ΔQ_G	<i>Passive power deviation of output Generator</i>
ΔP_L	<i>Load power disturbance</i>
ΔP_m	<i>Power deviation of turbine</i>
ΔP_{ref}	<i>Power reference</i>
$\Delta \omega$	<i>Frequency deviation response of LFC</i>
$\Delta \delta$	<i>Power deviation response of LFC</i>
ΔP_{12}	<i>Power deviation of tie line</i>
H	<i>Moment of inertia</i>
T_T	<i>Time constant of turbine</i>
T_g	<i>Time constant of governor</i>
D	<i>Load damping</i>
M	<i>Moment of inertia cross by 2</i>
E_{bt}	<i>Terminal of equivalent battery</i>
E_{do}	<i>Maximum dc voltage of the battery</i>
X_{co}	<i>Commutating reactance</i>
I_{BESS}	<i>DC current though the battery</i>
α	<i>Firing delay angle of converter</i>
r_{b1}	<i>overvoltage resistance</i>
c_{b1}	<i>overvoltage capacitance</i>
E_{b1}	<i>Battery overvoltage</i>
r_{bs}	<i>battery internal resistance</i>
r_{bp}	<i>self discharge resistance</i>
c_{bp}	<i>self discharge capacitance</i>
E_{boc}	<i>Battery open circuit voltage</i>
P_{BESS}	<i>Active power provided by BESS</i>

Q_{BESS}	<i>Reactive power provided by BESS</i>
E_d	<i>Damping signal</i>
ξ	<i>Damping value</i>
K_p	<i>Parameter Proportional controller</i>
K_i	<i>Parameter Integral controller</i>
K_d	<i>Parameter Differential controller</i>
K_{BESS}	<i>Parameter Gain converter of BESS</i>

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Abdil Jabbar Asyadili adalah seorang pemuda yang lahir di sebuah kabupaten yang terkenal akan produksi pisangnya, yaitu Kabupaten Lumajang, pada tanggal 26 April 1994. Penulis adalah putra pertama dari tiga bersaudara. Putra dari pasangan suami istri ibunda Murtini dan ayahanda Sukri. Penulis memulai sekolah dasar disebuah desa yang makmur dan tentram di wilayah Kecamatan paling ujung sebelah timur Kabupaten Lumajang, yaitu SDN Rojopolo 1. Masa kecil penulis dipenuhi masa-masa indah dengan lingkungan yang sangat asri dan air sungai yang sangat *swimable*. Dengan sawah dan perkebunan yang membentang luas, sungai-sungai masih kaya akan sumber daya ikan-ikannya, serta *habit* anak-anak disana yang senantiasa berpetualang tiap ada waktu luang, membuat semua kenangan indah itu sangat berharga, tidak bisa dibandingkan dengan kondisi anak-anak zaman sekarang. Lomba OSN Matematika tingkat Propinsi Jawa Timur pada tahun 2005, mewakili Kabupaten Lumajang sebagai perwakilan juara 2 tingkat kabupaten, merupakan pengalaman yang tidak akan terlupakan bagi penulis. Penulis melanjutkan sekolahnya di SMPN 1 Jatiroto. Penulis aktif di berbagai organisasi, serta menjadi murid tercepat kedua dalam penilaian akhir olahraga lari dan renang. Juara ke-empat lomba catur se sekolah merupakan salah satu pengalaman yang menarik. OSN matematika tingkat SMP, penulis hanya bisa menempati posisi ke-tujuh tingkat kabupaten. Penulis lalu melanjutkan sekolah di SMAN 2 Lumajang. SMA terbaik di Kabupaten Lumajang hingga saat ini. Saat masa SMA, penulis juga aktif dalam berbagai organisasi. Pengalaman yang paling berkesan adalah menjuarai lomba disiplin baris-berbaris se-Kabupaten Lumajang, penulis sempat merasakan menjadi finalis lomba Statistik dan Fisika yang diadakan oleh ITS. ITS adalah tempat berlabuh Penulis selanjutnya. Teknik Elektro menjadi jurusan yang dipilih oleh penulis. Dari awal penulis langsung memantapkan diri untuk memilih bidang studi Sistem Tenaga. Hal tersebut dicerminkan dengan masuknya penulis di Lab *Power System Simulation and Control* (PSOC) pada semester kedua. Prestasi yang paling berkesan adalah menjuarai PIMNAS dengan memperoleh medali Emas dari bidang presentasi. Penulis dapat dihubungi melalui email abdil.jabbar12@mhs.ee.its.ac.id.

Halaman ini sengaja dikosongkan